



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Schriftenreihe des
Instituts für Verkehr
ISSN 1613-8317

Fachgebiet
Verkehrsplanung
und Verkehrstechnik

Nutzung von Floating Traveller Data (FTD) für mobile Lotsendienste im Verkehr

Stefan Krampe

Heft V 20
Hochschulkennziffer D17

Herausgeber:

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Petersenstraße 30
64287 Darmstadt

www.tu-darmstadt.de/verkehr
fgvv@verkehr.tu-darmstadt.de

Schriftenreihe des Instituts für Verkehr
Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
Heft V 20

ISSN 1613-8317

Darmstadt 2007

„Der beste Weg, die Zukunft vorauszusagen, ist, sie zu gestalten.“

Alan Kay

...

VORWORT

Die Motivation für die vorliegende Forschungsarbeit hatte seinen Ursprung bereits in den 90er Jahren. In dieser Zeit etablierten sich erste kollektive Verkehrsinformationssysteme im Internet. Danach faszinierte mich der Gedanke, verkehrsmittelübergreifende und individuelle Informationsdienste zu planen und zu realisieren. Auslöser dafür waren vor allem die Arbeiten des Fachgebiets Verkehrsplanung und Verkehrstechnik sowie dem ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme an der TU Darmstadt. Unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze wurden hier verschiedene Forschungsprojekte zu dem Themenfeld initiiert. Ich danke Herrn Prof. Boltze für die Motivierung zur Erstellung der Forschungsarbeit und für die wertvollen Hinweise, die dazu beigetragen haben, die vorliegende Arbeit zu vollenden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Brilon möchte ich für die Übernahme des Korreferates herzlich danken. Zudem hat er mein Interesse am Verkehrswesen während meines Studiums an der Ruhr-Universität in Bochum geweckt, und war über viele Jahre ein sehr vertrauensvoller Ansprechpartner in wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Fragestellungen.

Die vorliegende Forschungsarbeit ist eingebettet in die Planungen eines verkehrsmittelübergreifenden Lotsendienstes COX, die von der Multimediainitiative des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft Verkehr und Landesentwicklung sowie der Deutschen Telekom AG gefördert wurde. Die Ursprungsidee des Lotsendienstes ist im ZIV durch Herrn Dr. Wolfgang Kieslich entstanden, dem ich an dieser Stelle für viele schöne berufliche als auch private Erfahrungen danken möchte. Meine Kollegen im ZIV haben durch ihre Herzlichkeit und ihr Engagement dazu beigetragen, viele Ideen erlebbar zu machen. Mein besonderer Dank gilt hier Dr. Uwe Plank-Wiedenbeck, Dr. Peter Sturm, Daniel Friedrich dem „Ortungsteam“ Dr. Jörg Pfister, Markus Kraft, Dr. Martin Schreiber, Andreas Siegel, Dr. Ludwig May sowie Jörg Dreiling, Christine Breeser, Dr. Annette Birgelen, Tobias Koch und Mark Hofmann. Den Mitarbeitern der T-Systems GEI in Ulm um Ralf Eilert, Reinhold Dobisch, Oliver Rockweiler, Heiner Amthauer sowie Wolfgang Stein der t-Info gilt mein Dank für den vielfältigen Austausch zwischen „Vision und Realität“ und für die Umsetzung der Forschungsarbeit. Nicht zuletzt wäre es ohne die Kooperation und die Datenbereitstellung der Stadt Darmstadt nicht möglich gewesen, das Forschungsthema zu entwickeln. Mein Dank gilt hier Norbert Stoll, Peter Lauer, Stefan Hartmann und Ralf Tank. Dem wissenschaftlichen Austausch mit den Mitarbeitern des Fachgebiets Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der TU Darmstadt verdanke ich viele wertvolle Impulse für meine Arbeit. Dr. Michael Stamm möchte ich für die wertvollen Hinweise zu den angewandten statistischen Methoden danken.

Meiner Partnerin, Dr. Susanne Grinzinger, danke ich für all die liebevolle Unterstützung, Motivation und Rücksichtnahme, die sie mir während der manchmal recht anstrengenden Zeit in den vergangenen Jahren zu Teil kommen ließ.

Schließlich möchte ich meiner Familie, vor allem meiner Mutter Gisela Krampe, meinem Vater Horst Krampe und meinem Bruder Dr. Dirk Krampe, für die Kraft und Unterstützung danken, die sie mir in vielen Situationen des Lebens gegeben haben.

Salzburg, im Dezember 2006

KURZFASSUNG

Die flächendeckende und verkehrsmittelübergreifende Verkehrsdatenerfassung ist eine wesentliche Anforderung für die Bereitstellung von kollektiven und individuellen Informationsdiensten im Verkehr. Der finanzielle Aufwand für eine vollständige Detektion des Motorisierten Individualverkehrs (MIV) und des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) ist groß und daher nicht denkbar. In der vorliegenden Arbeit wird daher ein neuer Lösungsweg beschrieben, bei dem Mobilfunkteilnehmer zur Verkehrsdatengenerierung im MIV und ÖV beitragen. Dazu werden die mit handelsüblichen mobilen Endgeräten (Mobiltelefon mit Ortungsmodul) gespeicherten Bewegungsinformationen anonymisiert ausgewertet. Der Verbreitungsgrad von Mobiltelefonen ist groß so dass es möglich wird, flächendeckend Aussagen zum aktuellen Verkehrsgeschehen zu treffen. Je nach Verkehrsmittelwahl des Reisenden werden spezifische verkehrstechnische Verfahren aktiviert, aus denen zentralenseitig Rückschlüsse zur Verkehrslage im jeweiligen Verkehrsmittel gezogen werden können. Die entwickelten Verfahren werden unter dem Begriff der „Floating Traveller Data (FTD)“ zusammengefasst. Die einzelnen FTD-Verfahren wurden in ein Gesamtkonzept eingebunden und in einem Feldversuch größtenteils erfolgreich erprobt. Mit FTD kann eine fortdauernde, verkehrsmittelübergreifende Reisebegleitung und -beeinflussung über Mobiltelefone ermöglicht werden (Lotsendienst). Es besteht allerdings auch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf einiger FTD-Verfahren (z.B. Ortung, Erkennung der Verkehrsmittelwahl, Fußwege und Radwege, verwendete ÖV-Linien, Entwicklung der Lotsendienste), der in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt wurde.

ABSTRACT

The area-wide collection of individual and public transport data is a substantial requirement to supply collective and individual transport information services. Due to high costs, a complete detection of motorised individual and public transport data is unthinkable. The present work describes a new solution, which is based on transport data generation via mobile telephone users. For this purpose the movement information of mobile phones (equipped with a positioning module) is being evaluated anonymously. The diffusion rate of mobile phones is high, so it is possible to get an area-wide overview of the transport situation. Depending on the choice of means of transportation the specific software modules are activated. With the collected information the occurrence of each means of transportation can be estimated. The developed procedures are summarized under the term "Floating Traveller Data (FTD)". The individual FTD procedures were merged into an integrated concept and successfully tested within a field test in Darmstadt. With FTD, travel monitoring and interaction can be facilitated continuously and overall, means of transportation via mobile phones. There is however need for further research and development of some FTD procedures which is specified in the present work.

INHALT

Seite

1	GRUNDLAGEN	1
1.1	Einführung	1
1.2	Forschungsziele	5
1.3	Aufbau der Arbeit und angewandte Methoden	10
1.3.1	Aufbau	10
1.3.2	Methoden	12
2	BISHERIGE VERFAHREN ZUR VERKEHRSDATENERFASSUNG	18
2.1	Einführung	18
2.2	Verkehrsdaten zur individuellen Reisendeninformation	20
2.2.1	Grundlagen	20
2.2.2	Routenberechnung im Motorisierten Individualverkehr	20
2.2.3	Fahrplanauskunft im Öffentlichen Verkehr	22
2.3	Datenerfassung Motorisierter Individualverkehr	24
2.3.1	Kennwerte und Detektionsmöglichkeiten im fließenden Verkehr – stationäre Datenerfassung	24
2.3.2	Mobil erhobene Daten / Floating-Car-Data (FCD)	25
2.3.3	Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs	33
2.4	Datenerfassung Öffentlicher Verkehr	35
2.4.1	Rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL)	35
2.4.2	Schnittstellen zu Datenmodellen im Öffentlichen Verkehr	37
2.4.3	Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs	38
2.5	Bewertung	38
2.5.1	Motorisierter Individualverkehr	38
2.5.2	Öffentlicher Verkehr	40

3	VERFAHRESENTWICKLUNG „FLOATING TRAVELLER DATA (FTD)“	41
3.1	Anforderungen an neue Verfahren	41
3.2	Funktionaler Ablauf	43
3.2.1	FTD-Verfahren auf mobilen Endgeräten	43
3.2.2	FTD-Verfahren – Motorisierter Individualverkehr	44
3.2.3	FTD-Verfahren – Öffentlicher Verkehr	44
3.2.4	FTD-Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr (Radfahrer, Fußgänger)	44
3.3	Untersuchungsraum	46
3.3.1	Einleitung	46
3.3.2	Detektion Öffentlicher Verkehr	46
3.3.3	Detektion innerstädtischer Straßenverkehr	47
3.4	FTD-Verfahren auf mobilen Endgeräten	48
3.4.1	Ortung innerhalb und außerhalb von Gebäuden	48
3.4.2	Ermittlung der Verkehrsmittelwahl	50
3.4.3	Datenreduktion und Übertragungsimpuls	57
3.5	Kommunikation	63
3.5.1	GPRS - General Packet Radio Service	64
3.5.2	UMTS - Universal Mobile Telecommunications System	64
3.5.3	WLAN – Wireless Lan	65
3.5.4	Bluetooth	66
3.5.5	Verknüpfung verschiedener Kommunikationsmedien	67
3.6	FTD-Verfahren – Motorisierter Individualverkehr	68
3.6.1	Einleitung	68
3.6.2	Datenanalyse und integriertes Datenmodell	70
3.6.3	Datenaufbereitung - Bildung von Tagesganglinien als Referenzbasis	80
3.6.4	Datenfusion	98
3.6.5	Ermittlung der Verkehrslage / Qualität des Verkehrsablaufs	111
3.7	FTD-Verfahren – Öffentlicher Verkehr	114
3.7.1	Einleitung	114
3.7.2	Ist-Fahrplan	115
3.8	FTD-Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr (Fußgänger und Radfahrer)	123
3.8.1	Einleitung	123
3.8.2	Zuordnung von Bewegungsspuren zum Datenmodell (MapMatching)	124
3.8.3	Ermittlung neuer Datenbankelemente	124

4	PRAXISTEST.....	128
4.1	Einführung	128
4.2	Verfahren auf mobilen Endgeräten.....	130
4.2.1	Positionsbestimmung	130
4.2.2	Datenreduktion Bewegungsspur	130
4.2.3	Übertragungsimpuls und Kommunikation	133
4.3	Verkehrslage – Motorisierter Individualverkehr.....	134
4.3.1	Testgebiet.....	134
4.3.2	Aufbau einer Referenzdatenbasis aus Detektoren.....	134
4.3.3	Zuordnung von Bewegungsspuren zu Datenmodellen (MapMatching)	137
4.3.4	Aufbau einer Referenzdatenbasis aus mobil erhobenen Daten.....	138
4.3.5	Plausibilitätsprüfung online erhobener Geschwindigkeitswerte durch Fusion stationär und mobil erhobener Daten	139
4.4	Verkehrslage – Öffentlicher Verkehr.....	144
4.4.1	Festlegung der Reiseroute	144
4.4.2	Ermittlung der nächstmöglichen Fahrtgelegenheit der Reiseroute	144
4.4.3	Auswahl der Fahrtgelegenheit.....	145
4.4.4	Durchführung der Fahrt	145
4.5	FTD-Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr (Fußgänger und Radfahrer)	147
5	RAHMENBEDINGUNGEN.....	148
5.1	Betreibermodell	148
5.2	Abbildung städtischer und regionaler Strategien des Verkehrsmanagements in einer Public-Private-Partnership	150
5.3	Rechtliche Aspekte / Datenschutz	154
5.3.1	Datenschutzrechtliche Risiken	154
5.3.2	Grundlagen nach europäischem und deutschem Recht	154
5.3.3	Anwendung auf mobile Lotsendienste im Verkehr	155
5.4	Durchdringungsrate und Kommunikationskosten.....	157
5.4.1	Durchdringungsrate	157
5.4.2	Kommunikationskosten	161

6	FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARF	163
6.1	Einleitung.....	163
6.2	Verfahrensbewertung	164
6.3	Handlungsbedarf	167
7	AUSBLICK.....	171
8	ZUSAMMENFASSUNG.....	172
9	ANLAGEN	178
9.1	Literaturverzeichnis.....	178
9.2	Bildverzeichnis.....	186
9.3	Tabellenverzeichnis.....	189
9.4	Abkürzungen	191
9.5	Bezeichnungen	192
9.6	Projekte zur Generierung von Floating-Car-Data (FCD)	194
9.7	FTD – Motorsierter Individualverkehr	199
9.7.1	Mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs	199
9.7.2	Erkennung von fehlerhaften Detektorwerten	203
9.7.3	Korrelationstest von Tagesganglinien mit Detektorreferenz.....	205
9.7.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Sensorfusion.....	206
9.8	Bewertung von Ortungssensoren für mobile Endgeräte.....	215
9.9	Projektbeschreibung COX	
	- Communication and Orientation eXpert	219
	Lebenslauf	223

1 Grundlagen

1.1 Einführung

Der Wunsch der Ortsveränderung von Personen und Gütern ist in den vergangenen Jahrzehnten beständig gestiegen. Die Folge ist ein hohes Verkehrsaufkommen auf den Straßen verbunden mit regelmäßigen Staus. Vor allem in Ballungsräumen ist der Öffentliche Verkehr (ÖV) eine wichtige Alternative zum Motorisierten Individualverkehr (MIV). Doch auch hier kommt es in den Verkehrsspitzenstunden zu Verspätungen von Bussen und Bahnen. Volkswirtschaftlich betrachtet entsteht ein monetärer Schaden, den es zu minimieren gilt. Nach statistischen Berechnungen steht jeder Deutsche etwa 70 Stunden im Jahr im Stau. Der Volkswirtschaft gehen dadurch nach Schätzungen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung jährlich etwa 97 Milliarden Euro verloren [SPEER, 2004]. Die bestehende Verkehrsinfrastruktur optimal zu nutzen, ist daher eines der verkehrspolitischen Ziele. Die flächendeckende Ermittlung der verfügbaren Verkehrsangebote und der freien Kapazitäten im MIV und im ÖV ist dabei eine wichtige Voraussetzung. Erhobene Verkehrsdaten sind zu qualitativ hochwertigen, korrekten und aktuellen Verkehrsinformationen aufzubereiten. Diese Informationen nutzen Verkehrsteilnehmer um angepasst, an den jeweils freien Kapazitäten in den Verkehrsnetzen, zu reagieren. Sie werden unter dem Begriff Mobilitätsdienste zusammengefasst. Die Akzeptanz von Mobilitätsdiensten hängt ganz entscheidend von der Aktualität und Korrektheit der Verkehrsinformationen und von der flächendeckenden Erfassung der Verkehrslage im Motorisierten Individualverkehr und im Öffentlichen Verkehr ab.

Im Motorisierten Individualverkehr ist die flächendeckende Installation von Detektoren¹ (stationäre Datenerfassung) kostspielig und wartungsintensiv. Daher werden Messstellen nur punktuell eingerichtet. Bevorzugt sind diese auf Bundesautobahnen zu finden. Auf innerstädtischen Straßen werden Detektoren vor allem zur verkehrsabhängigen Steuerung von Lichtsignalanlagen eingesetzt. Private Unternehmen bemühen sich seit einigen Jahren ebenfalls, Verkehrsdaten zu erfassen. Dabei kommen unter anderem Verfahren zum Einsatz, bei denen die Fahrzeuge selbst als mobile Sensoren, so genannte Floating-Car-Data (FCD), zur Verkehrsdatenerfassung beitragen (mobile Datenerfassung). Eine Zusammenführung von stationär und mobil erfassten Daten findet bislang selten statt.

Busse und Straßenbahnen sind in einigen Großstädten mit rechnergestützten Betriebsleitsystemen (RBL) ausgestattet, die die Fahrzeugstandorte dynamisch ermitteln und an eine Zentrale übertragen. Die Daten werden in erster Linie zur Überwachung und Optimierung der Betriebsabläufe verwendet. Punktuell werden an Haltestellen die realen Abfahrtszeiten der Fahrzeuge über dynamische Fahrgastinformationsanzeiger (DFI) visualisiert. Echtzeitdaten zur dynamischen Fahrplanauskunft werden bislang nur vereinzelt genutzt. In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt [RUDY, 2005] wurde die technische Machbarkeit und das Spektrum für dynamische Fahrgastinformationssysteme auf der Grundlage von Echtzeitdaten aufgezeigt. Eine Echtzeitfahrplanauskunft

¹ Detektor: Erfassungssystem zur Messung des Verkehrsaufkommens und / oder der Geschwindigkeit

kann nur dann eine große Wirkung erzielen, wenn flächendeckend Busse und Bahnen automatisiert erfasst werden.

Individuelle Mobilitätsdienste, die sowohl aktuelle Informationen zur Verkehrslage im MIV, zum Verkehrsangebot und zu Verspätungen im ÖV als auch eine Unterstützung im Nichtmotorisierten Individualverkehr (NMV) integriert anbieten, gibt es bislang nicht. Es besteht allerdings eine hohe Nachfrage seitens der Verkehrsteilnehmer nach solchen Mobilitätsdiensten, wie eine Untersuchung an der Technischen Universität Darmstadt gezeigt hat (vgl. [VOGT, 1999]). Die Kernaussagen der Untersuchung, bei der 121 Personen in der Region Frankfurt RheinMain zu mobilen standortbezogenen Informationsdiensten (LBS, Location-based-services) befragt wurden, sind in **Bild 1-1** zusammengefasst. Danach bestand eine große Nachfrage nach aktuellen Informationen zur Verkehrslage im MIV. Als zweitwichtigste Funktion wurden Informationen zu Verspätungen, Anschlussverbindungen und Wartezeiten im ÖV angesehen. Alle LBS-Dienste mit besonderer Bedeutung waren im Verkehr angesiedelt.

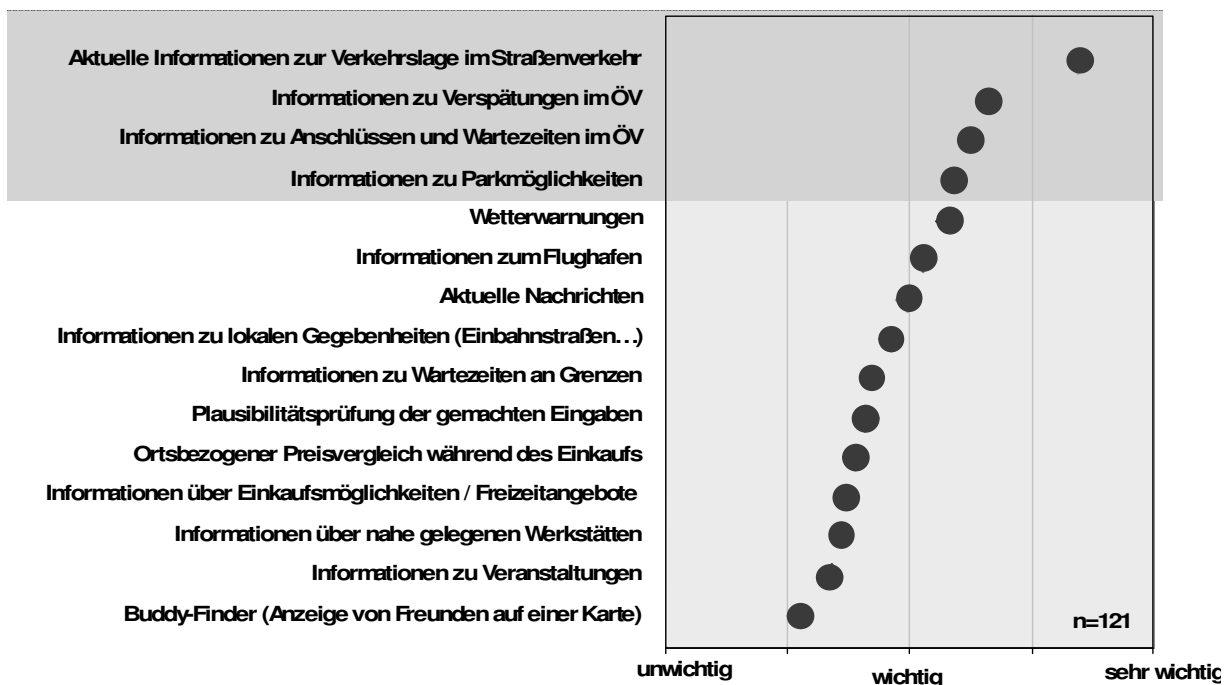


Bild 1-1: Interesse an mobilen Diensten mit Ortsbezug [VOGT, 1999]

Telekommunikationsunternehmen wollen ihr Angebot standortbezogener Informationsdienste erweitern, da sie einen Wachstumsmarkt darin sehen. Dies hat zur Folge, dass Hersteller von Mobiltelefonen immer leistungsfähigere Geräte mit Ortungsmodulen (z.B. GPS²) auf den Markt bringen. Der Aufbau des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo, das bis Ende 2010 in Betrieb gehen soll, wird einen weiteren Entwicklungsschub bei den Mobiltelefonen und standortbezogenen Informationsdiensten erzeugen.

Laut Einschätzung des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen [BMVBW, 2003] liefern intermodale Reiseinformationssysteme einen

² GPS: Global Positioning System, satellitengestütztes System zur weltweiten Positionsbestimmung

Beitrag für drei Bereiche einer nachhaltigeren Entwicklung des Verkehrssystems. Die „soziale Nachhaltigkeit“ wird gestärkt durch die Verbesserung und Erleichterung des Zugangs zum Verkehr und damit zu den gesellschaftlichen Austauschprozessen. Durch die bessere modale, räumliche und zeitliche Verteilung der Verkehrsströme wird die Effizienz des Verkehrssystems gesteigert und somit zur „ökonomischen Nachhaltigkeit“ beigetragen. Auf die Umwelt („ökologische Nachhaltigkeit“) wirken sich intermodale Reiseinformationen positiv aus (Reduktion der Lärm- und Schadstoffemissionen), wenn durch Effizienzsteigerung und modale Verlagerung kein Neuverkehr induziert wird. Dies sollte durch geeignete verkehrsplanerische und verkehrspolitische Lenkungsstrategien gesichert werden um die negativen Auswirkungen des Verkehrs zu minimieren.

Daneben ergeben sich aber auch für den einzelnen Verkehrsteilnehmer Zusatznutzen. Denn durch modale, zeitliche und räumliche Verlagerung der Reise können aufgrund des Informationsgewinns Zeit und Kosten eingespart sowie Komfort und Befinden gesteigert werden. Des Weiteren entsteht auch für andere Beteiligte der Wertschöpfungskette ein Mehrwert durch den Einsatz von intermodalen Reiseinformationssystemen.

Dieser Motivation folgend ist im ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme an der Technischen Universität Darmstadt die Idee für einen neuartigen positions- und situationsabhängigen Lotsendienst COX³ entstanden, der die bisherige Lücke der verkehrsmittelübergreifenden und individuellen Reisendeninformation schließen soll. Die vorliegende Arbeit ist ein wesentliches Modul dieser Forschungsidee. Das Forschungskonzept wurde bei der Multimediainitiative des Landes Hessen, getragen durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung und der Deutschen Telekom AG, eingereicht (vgl. **[MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002]**) und eine weitere Förderung beantragt. Der vorgelegte Ansatz wurde aus den folgenden Gründen als zielführend und förderungswürdig angesehen:

1. Zusammenführung von Verkehrsinformationen in einen Mobilitätsdienst für den
 - Motorisierten Individualverkehr,
 - Öffentlichen Verkehr,
 - für Fußgänger und Radfahrer (Nichtmotorisierter Verkehr).
2. Verkehrsteilnehmer mit Mobiltelefon können durch die Nutzung des Dienstes gleichzeitig zur Datenerfassung, je nach verwendetem Verkehrsmittel, beitragen.
3. Durch die Umsetzung des Mobilitätsdienstes innerhalb einer Public-Private-Partnership (PPP) werden die Verkehrsdaten flächendeckend zusammengeführt und können für unterschiedliche Anwendungen genutzt werden.

Die Umsetzung der „Vision“ COX wurde in drei Phasen unterteilt. In einer ersten Phase, die von Januar bis November 2003 verlief, wurde ein technisches Lösungskonzept durch die T-Systems GEI in Ulm, der t-info in München und dem ZIV-Zentrum für integrierte Verkehrs-

³ In Anlehnung an die Funktion eines Steuermannes auf einem Schiff (Navigieren) wurde als Bezeichnung für den neuartigen intermodalen Lotsendienst die englische Übersetzung von Steuermann – **COX** – in der Bedeutung **C**ommunication & **O**rientation **eX**pert – gewählt.

systeme an der Technischen Universität Darmstadt entwickelt. In Phase 2 wurden die technischen Komponenten zur Ortung von Mobiltelefonen, der durchgängigen Kommunikation und der Verkehrslageermittlung durch „Floating Traveller Data (FTD)“ entwickelt (2004) und umgesetzt. Darauf aufbauend soll in einer dritten Phase der Lotsendienst COX umgesetzt werden.

Bild 1-2 fasst die Entwicklungsphasen des Lotsendienstes zusammen. Daneben ist die Einordnung des in dieser Arbeit behandelten Themas „Floating Traveller Data (FTD)“ hervorgehoben.

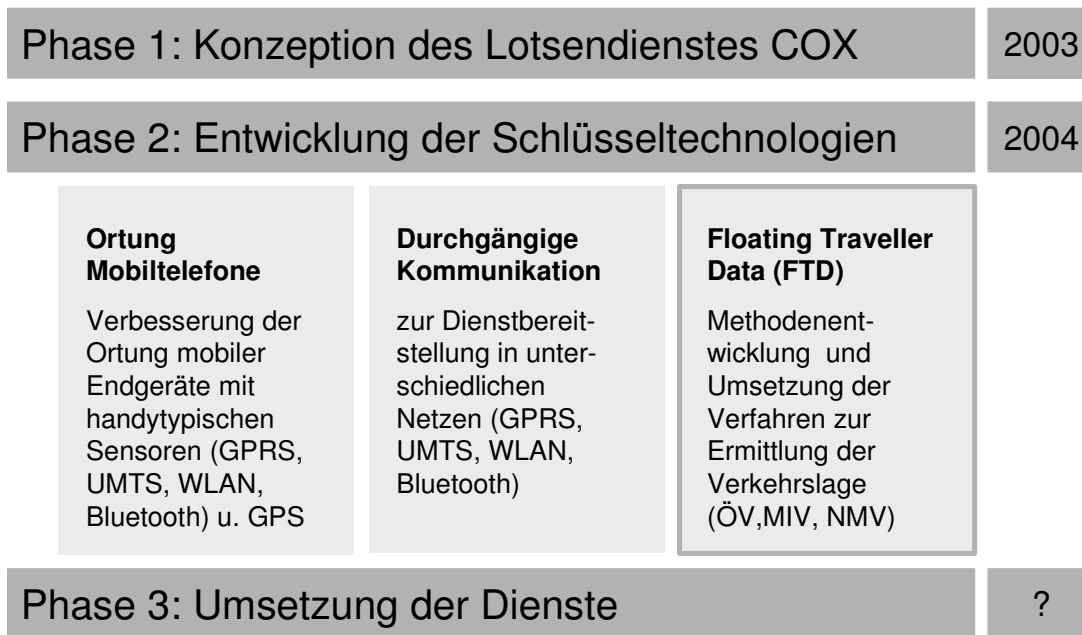


Bild 1-2: Einordnung des Themas FTD in das Konzept COX

Im Juli 2005 wurde der Pilotbetrieb des Lotsendienstes COX, in dem die hier vorgestellten Verfahren zum Einsatz kommen, durch den Minister des Hessischen Ministerium für Wirtschaft Verkehr und Landesentwicklung der Öffentlichkeit vorgestellt. Bei dem Pilotbetrieb in Darmstadt waren lediglich 10 Mobiltelefone im Einsatz und lieferten für das städtische Netz zuverlässige Verkehrsdaten. Das Projekt COX ist detailliert in **Anlage 9.9** beschrieben.

Bei einer Umsetzung der Forschungsidee und vor dem Hintergrund, dass Ende 2005 etwa 63 Millionen Bundesbürger (rechnerisch 76 % der Gesamtbevölkerung) über ein Mobiltelefon verfügten [STAT. BUNDESAMT, 2005], kann einerseits eine hohe Informationsverbreitung erzielt werden. Andererseits kann durch die hohe Marktdurchdringung mit Mobiltelefonen eine repräsentative Aussage zum Verkehrsgeschehen, unabhängig von der Verkehrsmittelwahl, getroffen werden, da die Geräte auch zur Datenerzeugung im Verkehr dienen. Dadurch wird eine flächendeckende Verkehrslageerfassung ermöglicht, die eine korrekte Verkehrsinformation und Steuerung des Verkehrs ermöglicht.

1.2 Forschungsziele

Ziel des in der vorliegenden Arbeit verfolgten Forschungsansatzes ist die verkehrsmittelübergreifende Bereitstellung von Echtzeitdaten für kollektive und individuelle Informationsdienste im Verkehr. Ein besonderer Fokus der vorliegenden Arbeit liegt dabei in der **Erstellung eines Gesamtkonzepts**, bei dem handelsübliche Mobiltelefone mit Ortungskomponente (z.B. GPS) als Erfassungseinheit genutzt werden. Je nach Verkehrsmittelwahl müssen unter-



Bild 1-3: Prognostizierte Ankunftszeiten zu einem Ziel basierend auf aktueller Verkehrslage (Darstellung Mobiltelefon)

alle verfügbaren Verkehrsmittel basierend auf der aktuellen Verkehrslage auf einem Mobiltelefon angezeigt.

Zur Erzeugung der in **Bild 1-3** dargestellten Informationen sind verkehrstechnische Kennwerte auszuwerten, aus denen die Reisezeiten für jedes Verkehrsmittel berechnet werden. Zur Berechnung der verkehrlichen Kennwerte sind Ortungsmodule in Mobiltelefonen (z.B. GPS-Empfänger) eine wichtige Unterstützung. Sie ermitteln Positionen in festen Zeitintervallen. Aus der Veränderung der Positions-Koordinate pro Zeiteinheit (i.d.R. Längen- und Breitengrad im Koordinatensystem des World Geodetic System von 1984) können die folgenden Kennwerte berechnet werden:

schiedliche Verfahren auf dem Mobiltelefon und in einer Verkehrszentrale aktiviert werden. Bei der Herleitung der Verfahren ist eine Plausibilitätsprüfung der mobil erhobenen Daten durchzuführen. Dazu sind bestehende Erfassungseinrichtungen (z.B. Detektoren im Straßennetz) öffentlicher Aufgabenträger in das Konzept mit einzubeziehen. Ziel ist es, aus den gewonnen Verkehrsdaten Reisendeninformationen verkehrsmittelübergreifend in einen Mobilitätsdienst zu integrieren. Die zu entwickelnden Verfahren werden unter dem Begriff „Floating Traveller Data (FTD)“ zusammengefasst. Für Radfahrer und Fußgänger ist eine flächendeckende Information über Rad- und Fußwege, die es derzeit nicht gibt, bereitzustellen. Wie Verkehrsinformationen vor Reiseantritt bereitgestellt werden können, zeigt das Beispiel in **Bild 1-3**. Darin werden prognostizierte Ankunftszeiten zu einem Ziel für

Wegänderung in einem Zeitintervall:

$$\Delta x = \sqrt{(x(t_i) - x(t_{i-1}))^2 + (y(t_i) - y(t_{i-1}))^2} \quad [\text{m}]$$

mit: $x(t_i), x(t_{i-1})$ = X-Koordinate zum Zeitpunkt t_i bzw. t_{i-1} [m]

$y(t_i), y(t_{i-1})$ = y-Koordinate zum Zeitpunkt t_i bzw. t_{i-1} [m]

Geschwindigkeit in einem Zeitintervall:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} [\text{m} / \text{s}] \quad [\text{m/s}]$$

mit: Δx = zurückgelegte Strecke in einem Zeitintervall [m]

Δt = Länge des betrachteten Zeitintervalls [s]

$$= t_i - t_{i-1}$$

Beschleunigung in einem Zeitintervall:

$$b = \frac{\Delta v}{\Delta t} [\text{m} / \text{s}^2] \quad [\text{m/s}^2]$$

mit: Δv = Geschwindigkeitsänderung in einem Zeitintervall [m/s]

$$= v(t_i) - v(t_{i-1})$$

Δt = Länge des betrachteten Zeitintervalls [s]

$$= t_i - t_{i-1}$$

Moderne GPS-Empfänger ermitteln zusätzlich die Bewegungsrichtung. Dadurch kann auch die Drehrate, also die Änderung der Bewegungsrichtung pro Zeiteinheit, errechnet werden.

Drehrate in einem Zeitintervall:

$$\omega = \frac{\rho(t_{i-1}) - \rho(t_i)}{\Delta t} \quad [^\circ / \text{s}]$$

mit: $\rho(t_{i-1}), \rho(t_i)$ = Bewegungsrichtung zum Zeitpunkt t_i bzw. t_{i-1} [Grad]

Δt = Länge des betrachteten Zeitintervalls [s]

$$= t_i - t_{i-1}$$

Die gezielte Auswertung der vorgenannten Kennwerte ermöglicht Rückschlüsse auf die Verkehrsmittelwahl und die jeweilige Verkehrssituation der Verkehrsteilnehmer. **Bild 1-4** zeigt Beispiele von Bewegungsspuren, die von Nutzern mit Mobiltelefonen in unterschiedlichen Verkehrsmitteln aufgezeichnet wurden. Für jeden der dargestellten Ortungspunkte werden die Kennwerte Geschwindigkeit, Beschleunigung und Drehrate berechnet. Je nach Verkehrsmittelwahl sind diese stark verschieden.

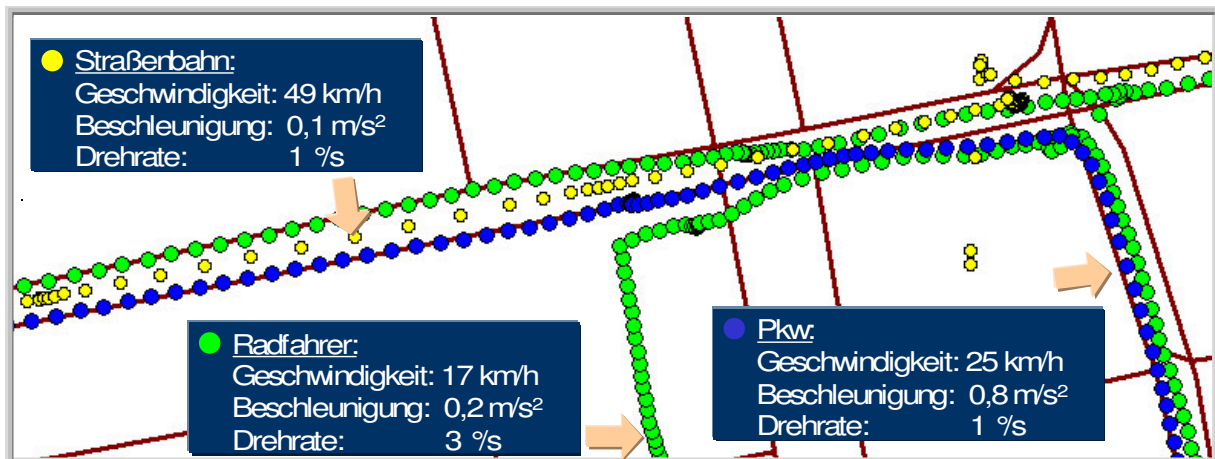


Bild 1-4: Bewegungsspuren Radfahrer, Fußgänger, Straßenbahn an einem Beispiel in Darmstadt

Die erfassten Bewegungsspuren sind durch die in dieser Arbeit hergeleiteten Verfahren auszuwerten, so dass Rückschlüsse auf die Verkehrslage gezogen werden können. Je nach Verkehrsmittelwahl werden bei der Entwicklung der FTD-Verfahren die folgenden Ziele verfolgt:

▪ **Motorisierter Individualverkehr**

Im MIV errechnet sich die Gesamtfahrzeit bis an ein Ziel aus der Summe der Fahrzeiten auf einzelnen Teilstrecken inklusive der Verlustzeiten an Knotenpunkten. In zentralenseitigen Verkehrsmodellen werden diese Teilstrecken mit ihren Längen und den mittleren Geschwindigkeiten hinterlegt. Je nach Verkehrssituation verändern sich diese Geschwindigkeiten auf den Teilstrecken. Die Ermittlung der momentanen Geschwindigkeit auf einzelnen Teilstrecken im Straßennetz in Abhängigkeit von der Tageszeit ist Ziel der Entwicklung der FTD-Verfahren im MIV. Dabei sind Plausibilitätsprüfungen der Einzelmesswerte durchzuführen.

▪ **Öffentlicher Verkehr**

Im ÖV werden die Sollfahrpläne, also wann ein Bus oder eine Bahn an einer Haltestelle abfährt, in Datenmodellen hinterlegt. Aufbauend auf diesen Datenmodellen wird heute schon eine individuelle Fahrplanauskunft gegeben⁴, bei der Reisende die Möglichkeit haben, durch die Eingabe von Startort und Zielort eine auf dem Sollfahrplan basierende optimale Reiseroute zu erhalten. Treten im ÖV Verspätungen auf, so muss der Reisende über mögliche Alternativen schnell informiert werden. Die flächendeckende Erfassung von Verspätungen ist derzeit sehr kostspielig und kann nur durch die Installation von Rechnergestützten Betriebsleitsystemen (RBL) erreicht werden. Ziel der FTD-Verfahren im ÖV ist es, Verspätungen einzelner Busse und Bahnen mit Mobiltelefonen zu erfassen und diese in den Datenmodellen zu hinterlegen. Aufbauend auf diesen angepassten Datenmodellen können Echtzeit-Fahrplanauskünfte bereitgestellt werden.

⁴ Siehe beispielsweise die Fahrplanauskunft im Internet der Deutschen Bahn AG: www.bahn.de

▪ Fußgänger und Radfahrer

Vor allem für ortsunkundige Fußgänger und Radfahrer ist es von Interesse, wie man auf kürzestem Weg zu einem bestimmten Ziel gelangt. Diese Information setzt ein Datenmodell voraus, in dem Fußwege und Radwege möglichst vollständig abgebildet sind. Derzeit am Markt verfügbare Datenmodelle bilden vor allem das Straßennetz in sehr hoher Qualität ab. Fußwege und Radwege werden nur vereinzelt integriert. Ziel des FTD-Verfahrens für Fußgänger und Radfahrer ist es daher, neue Datenbankelemente aus den Bewegungsspuren von Mobiltelefonen zu definieren.

In einer Startphase wird die Anzahl einsetzbarer Mobiltelefone gering sein. Um statistisch gesicherte Aussagen zum aktuellen Verkehrslagebild treffen zu können wird der Ansatz verfolgt, weitere Daten (z.B. von Detektoren im Straßennetz) zu nutzen, um die eingehenden „Floating Traveller Data (FTD)“ Plausibilitätsüberprüfungen zu unterziehen. So sind beispielsweise im innerstädtischen Straßennetz viele Lichtsignalanlagen mit Detektoren ausgestattet, die das Verkehrsaufkommen einzelner Knotenpunktzufahrten erfassen. Aus diesen Kennwerten können allerdings keine mittleren Geschwindigkeiten im vorgelagerten Streckenabschnitt errechnet werden. Gleichwohl können die gewonnen Daten sehr gut für Plausibilitätsprüfungen der mit Mobiltelefonen erhobenen Bewegungsdaten genutzt werden. Ziel bei der Entwicklung der FTD-Verfahren im MIV ist es daher, bestehende Erfassungssensorik von öffentlichen Aufgabenträgern zu integrieren. Diese fusionierten Daten können in Verkehrsrechnerzentralen für Steuerungs- und Informationszwecke weiter genutzt werden.

Neben den technischen Aspekten sollen in dieser Arbeit auch organisatorische Fragen zum Datenaustausch zwischen öffentlichen Aufgabenträgern und privatwirtschaftlichen Unternehmen im Rahmen einer *Public-Private-Partnership* (PPP) und zu möglichen Betreibermodellen sowie Fragen des Datenschutzes beantwortet werden.

An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Integration unterschiedlicher Anforderungen an die Datenerfassung im Motorisierten Individualverkehr, im Öffentlichen Verkehr und für Fußgänger und Radfahrer in ein Gesamtverfahren mit Anwendungen auf Mobiltelefonen und in einer Verkehrsrechnerzentrale eine überaus umfassende Aufgabe ist. Damit liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Entwicklung von Verfahren, die eine Umsetzbarkeit des Gesamtkonzepts ermöglichen. Einzelne in dieser Arbeit hergeleitete Verfahren sind erste umsetzbare Lösungen, aus denen sich der Handlungsbedarf für weitere Forschungsarbeiten ableitet.

Zusammenfassend stehen die folgenden Forschungsaspekte im Mittelpunkt der Arbeit:

- Entwicklung eines durchgängigen Gesamtkonzepts zur Verkehrslageerfassung im Motorisierten Individualverkehr und Öffentlichen Verkehr sowie mit Verfahren für Fußgänger und Radfahrer.
- Entwicklung von Verfahren zur Erfassung von Verkehrsdaten im Motorisierten Individualverkehr, im Öffentlichen Verkehr sowie von Fußgängern und Radfahrern, um darauf aufbauend verkehrsmittelübergreifende Mobilitätsdienste anbieten zu können. Als Erfassungs- und Informationsgeräte werden Mobiltelefone eingesetzt.

- Prüfung der Verwendbarkeit etablierter Verfahren zur Ermittlung der Verkehrslage im Motorisierten Individualverkehr.
- Ermittlung der momentanen Geschwindigkeit auf einzelnen Teilstrecken im Straßennetz in Abhängigkeit von der Tageszeit.
- Bewertung der Plausibilität mobil erhobener Daten. Fusion mobil erfasster Daten mit Verkehrsdaten stationärer Herkunft (Detektoren im Straßennetz) zur verbesserten Plausibilitätsprüfung.
- Aufgreifen gängiger verkehrstechnischer Standards, um eine Übertragbarkeit sicherzustellen.
- Ermittlung von Verspätungen im öffentlichen Verkehr mit Mobiltelefonen.
- Ermittlung von Fußwegen und Radwegen, die bislang nicht in Datenmodellen erfasst sind, aus der Analyse von Bewegungsspuren von Mobiltelefonen.
- Bewertung der entwickelten Verfahren auf deren Verwendbarkeit und Einsatzgebiete.
- Beschreibung möglicher Betreibermodelle im Rahmen einer Public-Private-Partnership.
- Betrachtung datenschutzrechtlicher Aspekte.
- Ableitung des weiteren Forschungsbedarfs.

1.3 Aufbau der Arbeit und angewandte Methoden

1.3.1 Aufbau

Nach einer allgemeinen Einführung in das Forschungsthema in **Kapitel 1** beinhaltet **Kapitel 2** die Darstellung und Entwicklung der Grundlagen. Bislang eingesetzte Verfahren der Verkehrsdatenerfassung im Öffentlichen Verkehr und im Motorisierten Individualverkehr werden analysiert und hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit für mobile Lotsendienste im Verkehr bewertet. Aus dieser Analyse werden die Anforderungen an die Datenerfassung mit mobilen Endgeräten in Kombination mit stationären Datenerfassungseinrichtungen (Detektoren im MIV, Rechnergestützte Betriebsleitsysteme im ÖV) abgeleitet.

In **Kapitel 3** werden neue Verfahren zur Erfassung von Verkehrsdaten im Motorisierten Individualverkehr, im Öffentlichen Verkehr sowie von Fußgängern und Radfahrern entwickelt, um darauf aufbauend freie Kapazitäten im Verkehrsnetz für mobile Lotsendienste abbilden zu können. Da die neuartige Erfassungsmethodik mit handelsüblichen mobilen Endgeräten (Mobiltelefonen) unabhängig von der Verkehrsmittelwahl des Nutzers eingesetzt werden kann, wird der Begriff „Floating Traveller Data (FTD)“ eingeführt. In **Kapitel 3.2** wird der funktionale Ablauf von der Datenerfassung bis zur zentralenseitigen Verarbeitung und der Bereitstellung der Verkehrsdaten für mobile Lotsendienste im Verkehr dargestellt. Dabei werden die in dieser Arbeit neu entwickelten Verfahren und der Einsatz bereits bewährter Verfahren herausgestellt. In den **Kapiteln 3.3 bis 3.8** werden die einzelnen FTD-Verfahren hergeleitet. Es wird unterschieden in Verfahren auf mobilen Endgeräten, zentralenseitige Verfahren im Motorisierten Individualverkehr, im Öffentlichen Verkehr sowie für Fußgänger und Radfahrer.

In **Kapitel 4** sind die Ergebnisse eines Praxistests dokumentiert.

Kapitel 5 zeigt die Rahmenbedingungen der entwickelten Verfahren auf. In **Kapitel 5.1** werden Fragestellungen zu möglichen Betreibermodellen im Rahmen einer Public-Private-Partnership (PPP) behandelt. Es werden Lösungsvorschläge gegeben, wie einerseits Aspekte des Verkehrsmanagements technisch und organisatorisch berücksichtigt werden können. Andererseits werden Hinweise zu einem möglichen Geschäftsmodell gegeben, das den wirtschaftlichen Betrieb eines Lotsendienstes unter Verwendung von „Floating Traveller Data (FTD)“ ermöglicht. **Kapitel 5.3** betrachtet die datenschutzrechtlichen Aspekte bei der Nutzung und Auswertung von Bewegungsdaten, die mit Mobiltelefonen erfasst und an eine Zentrale übertragen werden. Dabei wird das Deutsche und Europäische Recht analysiert.

In **Kapitel 6** werden die entwickelten Verfahren hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit bewertet. Darauf aufbauend wird der weitere Handlungsbedarf bei der Weiterentwicklung der Verfahren gegeben.

Neben einem Ausblick in **Kapitel 7** werden in **Kapitel 8** die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst.

In den **Anlagen** werden Literaturverzeichnis, Bildverzeichnis, Tabellenverzeichnis und weitere wichtige Ergebnisse, deren Inhalte den Umfang des Hauptteils der Arbeit überschritten hätte, beigefügt.

Die Struktur der Arbeit ist in der folgenden Gesamtübersicht zusammengefasst (**Bild 1-5**):

Kap. 1: Grundlagen		Kap. 2: Verfahren zur Datenerfassung	
1.1. Einführung		2.1. Einführung	
1.2. Forschungsziele		2.2. Verkehrsdaten zur individuellen Reisendeninformation	
1.3. Aufbau und angewandte Methoden		2.3. Datenerfassung im MIV	
		2.4. Datenerfassung im ÖV	
		2.5. Bewertung	
Kap. 3: Verfahrensentwicklung „Floating-Traveller-Data (FTD)“			
3.1. Anforderungen		3.5. Kommunikation	
3.2. Funktionaler Ablauf		3.6. FTD-Verfahren – MIV	
3.3. Untersuchungsraum		3.7. FTD-Verfahren – ÖV	
3.4. FTD-Verfahren auf mobilen Endgeräten		3.8. FTD-Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr (Fußgänger und Radfahrer)	
Kap. 4: Praxistest		Kap. 5: Rahmenbedingungen	
4.1. Einführung		5.1. Betreibermodell	
4.2. Verfahren auf mobilen Endgeräten		5.2. Verkehrsmanagementstrategien	
4.3. Verkehrslage MIV		5.3. Rechtliche Aspekte / Datenschutz	
4.4. Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr		5.4. Durchdringungsraten und Kommunikationskosten	
Kap. 6: Forschungs- und Entwicklungsbedarf			
Kap. 7: Ausblick			
Kap. 8: Zusammenfassung			

Bild 1-5: Aufbau der Arbeit

1.3.2 Methoden

Die systematische Anwendung wissenschaftlicher Methoden ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Beantwortung von Forschungsfragen. In dieser Arbeit werden unterschiedliche Methoden eingesetzt, die in **Tabelle 1-1** zusammengefasst sind.

Kapitel	Inhalt	Methoden
2	Grundlagen	Literaturrecherche
3.2	Funktionaler Ablauf	Systematischer Entwurf
3.4	FTD-Prozesse auf mobilen Endgeräten	Erhebungen; räumliche Analysen von Bewegungsrichtungen, Bewegungsgeschwindigkeiten
3.4	Kommunikation	Literaturrecherche
3.6	FTD – Motorisierter Individualverkehr	Erhebungen, Zeitreihenanalysen, räumliche Analysen, mikroskopische Simulation, Software-Entwicklung
3.7	FTD – Öffentlicher Verkehr	Erhebungen, räumliche Analysen
3.8	FTD – Nichtmotorisierter Verkehr	Erhebungen, räumliche Analysen, Cluster-Analysen
4	FTD – Praxistest	Erhebungen, Datenanalysen, räumliche Analysen, Literaturrecherche, Reflexion
5.1	Betreibermodell	Reflexion, systematischer Entwurf
5.3	Rechtliche Aspekte / Datenschutz	Literaturrecherche, Reflexion
6	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	Reflexion, Systembewertung
7 / 8	Ausblick und Zusammenfassung	Reflexion

Tabelle 1-1: Eingesetzte wissenschaftliche Methoden

Eine detaillierte Betrachtung verlangen

- statistische Grundlagen,
- Verkehrserhebungen,
- mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs sowie
- räumliche Analysen unter Anwendung geografischer Informationssysteme (GIS).

Statistische Grundlagen

Zeitreihenanalyse

Die Zeitreihenanalyse wird in der vorliegenden Arbeit für die Verfahrensentwicklung im Motorisierten Individualverkehr (**Kapitel 3.6**) eingesetzt. Es werden damit Messergebnisse von Detektoren im Straßennetz (Zählwerte, Belegungsgrade) sowie Bewegungsdaten von Mobiltelefonen (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Drehrate) ausgewertet.

Eine Zeitreihe ist die zeitlich geordnete Abfolge der Beobachtungen von statistischen Merkmalen, die unterschiedliche Ausprägungen haben können. Ein Beispiel einer Zeitreihe ist die Anzahl von Fahrzeugen pro Zeiteinheit, die einen Streckenabschnitt in Abhängigkeit von der Tageszeit passieren. Einen Überblick über die Eigenheiten einer Zeitreihe gibt die graphische Darstellung eines Zeitreihenpolygons. Dabei ist die Abszisse die Zeitachse und die Ordinate die Zeitreihenwertskala. Das Zeitreihenpolygon entsteht durch die lineare Verbindung der einzelnen definierten Punkte. Zeitreihen wurden für Zählwerte von Detektoren und die Ermittlung von mittleren Geschwindigkeiten einzelner Streckenabschnitte im Straßennetz erstellt. Zur weiteren Zeitreihenanalyse werden arithmetischen Mittelwertbildung, Streuung und die Korrelationsrechnung angewandt.

- **Arithmetisches Mittel und Standardabweichung**

Als Mittelwert bezeichnet man eine definierte statistische Kenngröße die Aufschluss über den Durchschnittswert der vorliegenden Messwerte gibt. Die Standardabweichung ist eine Maßzahl der Streuung. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung um den Mittelwert. Unter Streuung fasst man Maßzahlen zusammen, die der Einschätzung der Streubreite von Stichprobenwerten um ihren Mittelwert dienen.

- **Korrelation**

Empirische Zeitreihen zeigen im Allgemeinen mehr oder weniger regelmäßige, sich wiederholende Bewegungsmuster. Deren Beschreibung ist in Grenzen dadurch möglich, dass die Messung der Korrelation zwischen den Werten von Zeitreihen durchgeführt wird. Ein wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung der Eigenschaft einer Zeitreihe $y_1..y_n$ sind nach **LUEBBERT [1997]** empirische Korrelationen. Darunter versteht man Maße für den Zusammenhang zwischen Beobachtungsdaten, die einen bestimmten zeitlichen Abstand zueinander haben. Die lineare Zusammenhangsmessung zwischen den Werten einer Zeitreihe erfolgt durch die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten. Der Korrelationskoeffizient gibt Auskunft darüber, ob zwei oder mehr Zeitreihen in einem statistischen Zusammenhang stehen ($R=1$, $R=-1$) oder unabhängig voneinander sind ($R=0$). Für die Berechnung der Korrelation zwischen Zeitreihen sind die Standardabweichung und das arithmetische Mittel der Zeitreihe zu ermitteln.

Cluster-Analyse

Wenn es Zusammenhänge zwischen einer größeren Anzahl von Positionspunkten unterschiedlicher Bewegungsspuren gibt, werden sich diese in bestimmter Weise häufen. Das Erkennen von Häufungen (englisch: Cluster) und die Interpretation der beobachteten Zusammenhänge ist Aufgabe der Cluster-Analyse. Die Cluster-Analyse teilt also viele Untersuchungsobjekte nach Maßgabe ihrer Ähnlichkeit in homogene Gruppen ein, die möglichst gut voneinander separierbar sein sollen. Die Cluster-Analyse wird zur Ermittlung neuer Datenbankelemente für Fußgänger und Radfahrer eingesetzt, die sich aus der Erkennung von Spürhäufungen auf einzelnen Streckenabschnitten ergeben. Methodisch gesehen misst die Cluster-Analyse Abstände zwischen Merkmalsträgern. Wertepaare, die in geringem Abstand vorkommen, werden in gemeinsame Cluster aufgenommen. Das verwendete Distanzmaß ist die euklidische Distanz, die nach dem Satz des Pythagoras berechnet wird **LUEBBERT [1997]**.

Verkehrserhebungen

Durch Verkehrserhebungen werden orts- und zeitabhängige verkehrliche Kenngrößen erfasst. Die Güte der Aussagen hängt von der Brauchbarkeit der Messergebnisse für die jeweils betrachtete Aufgabenstellung ab. Für eine vollständige Messung des Verkehrsablaufs ist die Aufnahme von Zustandsgrößen aller Fahrzeuge im Untersuchungsgebiet über die gesamte Zeitdauer der Verkehrsmessung erforderlich. Die vollständige Erfassung von Verkehrsabläufen mit zahlreichen, sich individuell bewegendenden Fahrzeugen ist auf Grund des großen Erhebungsaufwands nicht möglich. Innerhalb der FTD-Verfahrensentwicklung wurden verschiedene Arten von Messungen durchgeführt. Einerseits fanden Verkehrszählungen an unterschiedlichen Messquerschnitten statt (lokale Messungen), bei denen das Verkehrsaufkommen in einem Zeitintervall erhoben wurde. Andererseits wurden Messfahrten mit einem Mobiltelefon und Ortungskomponente durchgeführt, bei denen die in unterschiedlichen Streckenabschnitten gefahrenen Geschwindigkeiten ermittelt wurden. Aus diesen Messergebnissen errechnen sich mittlere Geschwindigkeiten für einzelne Zeitintervalle und Streckenabschnitte (momentane Messungen). Eine wissenschaftliche Unterscheidung der Messmethoden wird nachfolgend hergeleitet **[BRILON, 1999]**:

Lokale Messungen:

Bei lokalen Messungen werden an einem Beobachtungsquerschnitt (Messquerschnitt) alle Fahrzeuge (bzw. Beobachtungsmerkmale) in einem Zeitintervall erfasst. Folgende Kennwerte werden dabei erhoben:

- Anzahl der Fahrzeuge (M) in einem Zeitintervall Δt
- Einzelwerte der Geschwindigkeiten von Fahrzeugen im Zeitintervall Δt

Aus diesen Kennwerten werden errechnet:

- Verkehrsstärke am Beobachtungsquerschnitt X im Zeitintervall Δt

$$q = \frac{M}{\Delta t} [Fz/h]$$

- Mittlere lokale Geschwindigkeit am Beobachtungsquerschnitt X im Zeitintervall Δt

$$\bar{v}_l = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M v_i [km/h]$$

Momentane Messungen:

Bei momentanen Messungen werden zu einem Zeitpunkt t (bzw. Zeitintervall Δt) alle Fahrzeuge (bzw. Beobachtungsmerkmale) in einem Streckenabschnitt erfasst. Folgende Kennwerte werden dabei erhoben:

- Anzahl der Fahrzeuge (M) in einem Wegabschnitt Δx .
- Einzelwerte der Geschwindigkeiten von Fahrzeugen im Wegabschnitt Δx zum Zeitpunkt t.

Aus diesen Kennwerten werden errechnet:

- Verkehrsdichte zum Zeitpunkt t im Wegabschnitt Δx

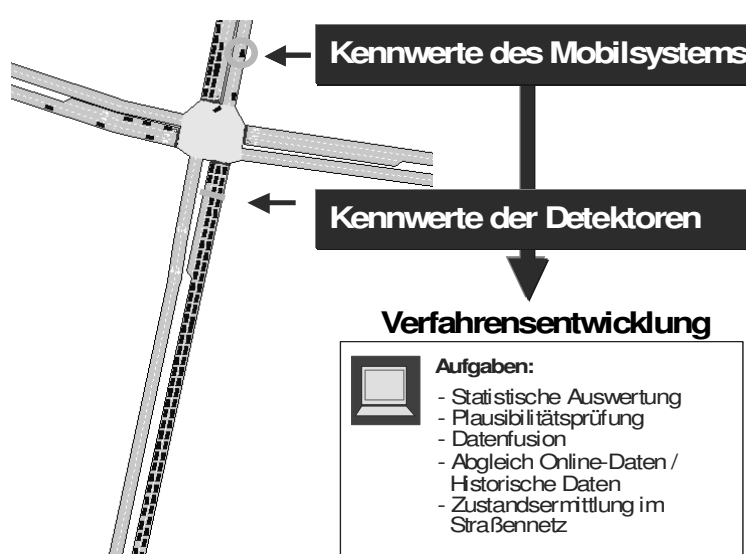
$$k = \frac{M}{\Delta x} [Fz/km]$$

- Mittlere momentane Geschwindigkeit im Wegabschnitt Δx zum Zeitpunkt t

$$\bar{v}_m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M v_i [km/h]$$

Mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs

Die Entwicklung und Überprüfung eines Modells zur Beurteilung der Qualität des Verkehrs-



ablaufs im Straßennetz auf Basis stationär und mobil erhobener Daten erfordert den Zugriff auf eine umfassende Datensammlung. Zu Beginn der Forschungsarbeiten lagen nur in begrenztem Umfang Detektordaten und Bewegungsdaten mobiler Endgeräte für eine Analyse und zum Verfahrensaufbau vor. Daher wurde ein mikroskopisches Verkehrsmodell eingesetzt, mit dessen Hilfe das Verhalten jedes einzelnen im Straßennetz fahrenden Fahrzeugs abgebildet werden konnte. Dazu wurde das mikroskopische Verkehrsmodell AIMSUN der TSS-Transport

Bild 1-6: Verfahrensentwicklung unter Verwendung der mikroskopischen Simulation

den konnte. Dazu wurde das mikroskopische Verkehrsmodell AIMSUN der TSS-Transport

Simulation Systems aus Barcelona verwendet. Standardmäßig liefert das Programm Kennwerte von Detektoren, die im modellierten Verkehrsnetz abgebildet sind. Nicht ausgegeben werden Bewegungsinformationen einzelner Fahrzeuge, die sich durch das Verkehrsnetz bewegen. Daher wurde die Entwicklung eines Softwaremoduls erforderlich, das die Fahrzeuginformationen (befahrene Streckenabschnitte, mittlere Geschwindigkeiten) automatisiert in eine Datenbank exportiert. Aus den so gewonnen Kennwerten der Fahrzeuge (mobile Daten) und Detektorwerten (stationäre Daten) konnten umfangreiche Zeitreihenanalysen der Geschwindigkeitsverteilungen und des Verkehrsaufkommens für einzelne Streckensegmente durchgeführt werden. Zum Aufbau des Verkehrsmodells waren folgende Arbeitsschritte erforderlich:

1. Kodierung des Verkehrsnetzes (Fahrstreifen, Knotenpunkte, Detektoren, Signalzeitenpläne).
2. Abbildung der Quelle-Ziel-Beziehungen.
3. Durchführung von Verkehrserhebungen.
4. Kalibrierung des Verkehrsmodells auf Basis der Verkehrserhebungen.
5. Entwicklung eines Softwaremoduls zum Export der Detektordaten und der Bewegungsdaten von Fahrzeugen in ein Datenmodell.
6. Zeitreihenanalyse der gewonnen Daten und Aufbau des FTD-Verfahrens für den Motorisierten Individualverkehr (vgl. **Kapitel 3.6**).

Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Simulationsläufe enthält **Anhang 9.7.1**.

Räumliche Analysen unter Anwendung geografischer Informationssysteme

Der Standort von Verkehrsteilnehmern wird durch die Ermittlung von Positionsdaten (z.B. Längen- und Breitengrad im Koordinatensystem WGS 84) in einen Raumbezug gestellt. Die systematische Analyse von Positionsdaten, die in vorgegebenen Zeitintervallen erhoben werden, ermöglicht die Berechnung von verkehrstechnischen Kennwerten (z.B. Bewegungsgeschwindigkeit und Beschleunigung). Für die Analyse räumlicher Daten eignen sich ganz besonders geografische Informationssysteme (GIS) [RINDSFÜSER, 2002]. Sie ermöglichen – wie alle Informationssysteme – die Erfassung, Verwaltung, Analyse und Ausgabe von Daten. Geografische Informationssysteme bieten den entscheidenden Vorteil, auch räumliche Eigenschaften mit einzubeziehen. Durch raumbezogene Analysemethoden können neue Informationen und Erkenntnisse generiert werden. Unter dem Begriff GIS versteht man einerseits das Werkzeug, das sich aus der Hard- und Software zusammensetzt. Andererseits sind darunter die eigentlichen Geodaten zu verstehen, die geografischen Analysen unterzogen werden können. Geografische Informationssysteme eignen sich zur Verwaltung großer Datenmengen, mit denen weitergehende Berechnungen und Analysen durchgeführt werden können. Die Datenausgabe erfolgt neben Berichten, Tabellen und Diagrammen vor allem in Form von Karten. In so genannten thematischen Karten können beispielsweise Geschwindigkeitsniveaus von Bewegungsspuren grafisch dargestellt werden. Die räumlichen Daten werden in einem geografischen Informationssystem mit Hilfe des Layer-Prinzips strukturiert,

d.h. jede Informationskategorie wird in einer eigenen Kartenschicht, einem so genannten Layer, abgebildet. So kann in einem Layer das Straßennetz dargestellt werden, während in dem darüber liegenden Layer die Bewegungsspuren von mobilen Endgeräten visualisiert werden. Dieses Prinzip bietet den Vorteil, dass zur Durchführung einer bestimmten Aufgabe nur die relevanten Layer eingeblendet werden und damit eine übersichtliche Darstellung gewährleistet ist.

2 Bisherige Verfahren zur Verkehrsdatenerfassung

2.1 Einführung

Bei Verfahren zur Verkehrsdatenerfassung ist von maßgebender Bedeutung, ob die verkehrstechnische Anwendung in einem Handlungsfeld angesiedelt ist, welches hoheitliche Aufgaben wahrnimmt oder in dem privatwirtschaftliche Interessen verfolgt werden [FGSV, 2003]. Es werden daher die folgenden zwei Anwendungsgebiete identifiziert:

- Anwendungen mit hoheitlichem Charakter (z.B. Verkehrssteuerung) sowie
- Anwendungen ohne hoheitliche Ansprüche (z.B. Mobilitätsdienstleitungen privater und öffentlicher Anbieter).

Gründe für die Datenerfassung unter hoheitlicher Leitung sind in einer verbesserten Verkehrssicherheit (z.B. frühzeitige Erkennung von Staus) und Verkehrssteuerung (z.B. bei Staus auf Autobahnen) zu sehen. Bei Anwendungen ohne hoheitlichen Hintergrund steht vor allem die Verkehrsinformation im Vordergrund. Es ist denkbar, dass mit diesen Verkehrsinformationen eine Kommerzialisierung stattfinden kann.

Methodische und technische Ansätze zur Fusion von Verkehrsdaten unterschiedlicher Herkunft können in Hinweisen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [FGSV, 2003] abgeleitet werden. Gelingt es bei einer Umsetzung, Anforderungen in Hinblick auf Verlässlichkeit, Erhebungszyklus und Ausfallkonzeption bei der Erfassung von Verkehrsdaten zu erfüllen, ergibt sich hieraus für öffentliche Aufgabenträger, die auf Grundlage der Informationen Steuerungsmaßnahmen einleiten können, als auch für privatwirtschaftliche Unternehmen mit dem Ziel der Generierung von Dienstleistungen und deren anschließender Vermarktung, eine zukunftssträchtige Zusammenarbeit. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass bundesweit tätige Mobilitätsdienstleister bemüht sind, flächendeckend Verkehrsdaten zu erheben. Neben eigenständig durch das Unternehmen generierten Daten können auch Daten öffentlicher Aufgabenträger den Datenpool vervollständigen. Durch die Festlegung von Geschäftsmodellen kann die Datenüberlassung zwischen den öffentlichen und privaten Partnern geregelt werden, so dass für alle Beteiligten ein Nutzen der Zusammenarbeit entstehen kann.

Für mobile Lotsendienste im Verkehr sind je nach Verkehrsmittelwahl unterschiedliche Verkehrsdaten durch entsprechende Systeme zu erfassen:

- **Motorisierter Individualverkehr**
In Abhängigkeit von der Tageszeit sind die momentane Geschwindigkeiten für einzelne Streckenabschnitte zu ermitteln.
- **Öffentlicher Verkehr**
Für einzelne Busse und Bahnen sind die tatsächlichen Ankunftszeiten an Haltestellen zu berechnen. Daraus kann ein Soll-/Ist-Vergleich des Fahrplans durchgeführt werden.
- **Radfahrer und Fußgänger**
Kenntnis über Rad- und Fußwege sind für diese Verkehrsteilnehmer von Bedeutung. Entsprechend müssen Rad- und Fußwege in Datenmodellen abgelegt sein.

Fußgänger- und Radfahrer können in der Regel unabhängig von Kapazitätsbeschränkungen ihre Fortbewegungsgeschwindigkeit frei wählen. Daher ist es für diese Verkehrsteilnehmer nicht sinnvoll, ähnlich wie im Motorisierten Individualverkehr oder Öffentlichen Verkehr, Verkehrslagebilder zu erzeugen. Es wird daher in den folgenden Abschnitten ausschließlich auf die Verkehrsdatenerfassung im Motorisierten Individualverkehr und Öffentlichen Verkehr eingegangen.

Bis zur Bereitstellung von Verkehrsinformationen im Motorisierten Individualverkehr und Öffentlichen Verkehr werden die folgenden Phasen durchlaufen:

- **Datenerfassung je Verkehrssystem**

Bei der Datenerfassung (z.B. durch Detektoren) können Fehler auftreten. Diese sind zu identifizieren und gegebenenfalls herauszufiltern. Die verbleibenden Messwerte sind in ein statistisches Modell zu überführen, so dass eine zuverlässige Schätzung der gesuchten Zustands- und Kenngrößen möglich wird.

- **Verbindung von Daten aus mehreren Quellen je Verkehrssystem**

Die Datenfusion beinhaltet im allgemeinen komplexe Datenverarbeitungsprozesse wie z.B. Mustererkennung oder Verkehrsprognose. Dabei werden unterschiedliche Quellen genutzt (z.B. Detektoren, Videoanalyse, Floating-Car-Data, weitere Sensoren).

- **Generierung verkehrsmittelübergreifender Verkehrslagebilder**

Durch die Definition von einheitlichen Kriterien zur Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs im Motorisierten Individualverkehr und im Öffentlichen Verkehr wird es möglich, verkehrsmittelübergreifende Verkehrslagebilder zu erzeugen. Diese können im weiteren sowohl für Mobilitätsdienstleitungen privater Dienstleister als auch für administrative Zwecke der öffentlichen Aufgabenträger genutzt werden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird der aktuelle Entwicklungsstand bei der Verkehrsdatenerfassung im Motorisierten Individualverkehr und im Öffentlichen Verkehr zusammenfassend dargestellt. Zunächst werden im **Kapitel 2.2** die technischen Grundlagen der Aufbereitung von Verkehrsdaten zur individuellen Reisendeninformation gelegt. Darin werden die verkehrlichen Kennwerte, die für einen verkehrsmittelübergreifenden Lotsendienst zu erfassen sind, beschrieben.

In den **Kapiteln 2.3** und **2.4** werden bestehende Verfahren der Datenerfassung analysiert, die in **Kapitel 2.5** einer abschließenden Bewertung unterzogen werden.

2.2 Verkehrsdaten zur individuellen Reisendeninformation

2.2.1 Grundlagen

Mobile Lotsendienste im Verkehr nutzen aktuelle Verkehrsdaten für individuelle Routenberechnungen. Von der Erfassung bis zur eigentlichen Information der Verkehrsteilnehmer werden eine Vielzahl von Stufen durchlaufen. Die technische Funktionsweise der Routenberechnung soll daher zunächst näher beleuchtet werden, bevor in den weiteren Kapiteln auf die eigentliche Verkehrsdatenerfassung eingegangen wird. Bei der Analyse der bisherigen Verfahren zur Verkehrsdatenerfassung ist zu prüfen, ob die verkehrlichen Kennwerte zur Generierung verkehrsmittelübergreifender Informationen in Datenmodellen hinterlegt sind. Es wird dadurch verständlicher, welche Kennwerte für mobile Lotsendienste im Verkehr zu erfassen und wie diese in Datenmodellen zu hinterlegen sind.

2.2.2 Routenberechnung im Motorisierten Individualverkehr

Das Straßennetz wird für die Nutzung von Routingdiensten durch Knoten und gerichtete Kanten in Datenmodellen abgelegt. Die Knoten entsprechen Verzweigungsstellen im Straßennetz (z.B. Knotenpunkte, Autobahnausfahrten). Die eigentlichen Straßen werden in Kanten hinterlegt. Zu jeder Kante werden Attribute definiert, die die Eigenschaften des Straßensegments beschreiben. Neben der Definition der Straßennamen werden auch Eigenschaften definiert, aus denen die Fahrzeit auf den Kanten berechnet wird. Hierzu gehören die Kantenlänge und die Geschwindigkeit. Ein Beispiel dazu zeigt **Bild 2-1**.

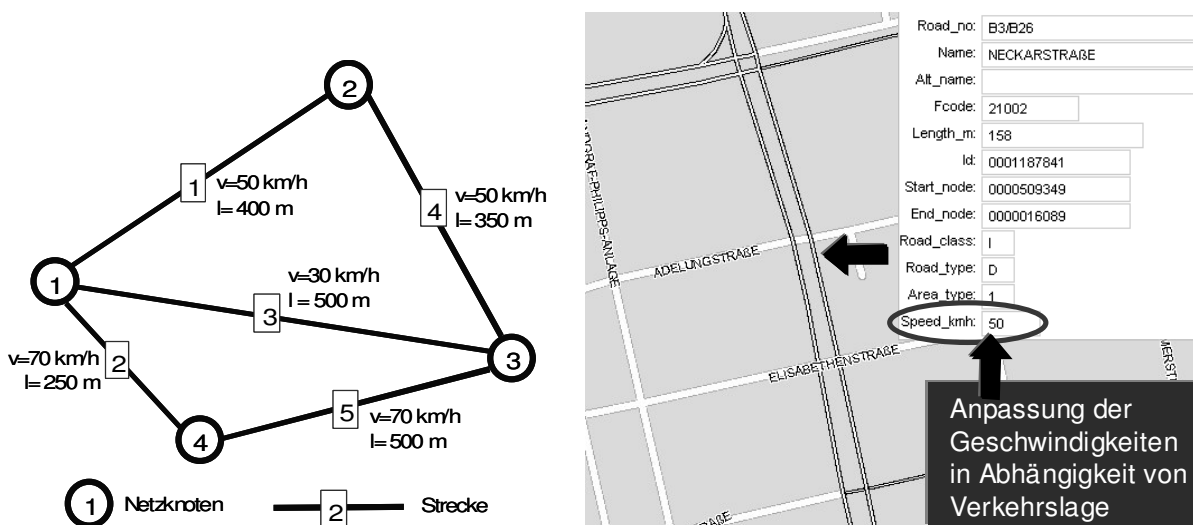


Bild 2-1: Abbildung des Straßennetzes in einem Knoten-Kanten-Modell

Aufbauend auf dem so hinterlegten Datenmodell können individuelle Routenberechnungen durchgeführt werden. Ein Optimierungsalgorithmus errechnet dazu die optimale Route zwischen zwei Orten. Dazu werden vom Verkehrsteilnehmer Startort und Zielort eingegeben. Je nach Optimierungskriterium (z.B. kürzeste oder schnellste Route) werden unterschiedliche Berechnungsergebnisse erzeugt.

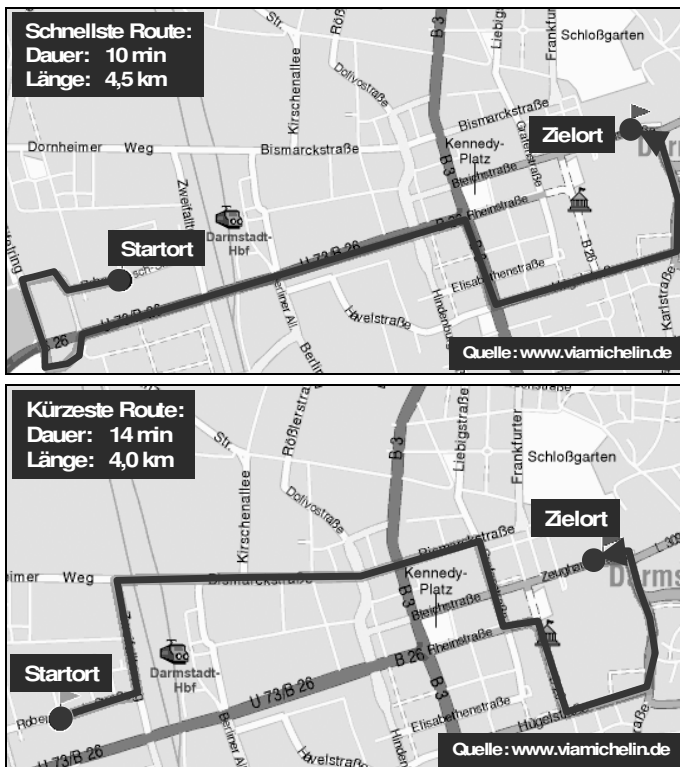


Bild 2-2: Beispiel einer Routenberechnung im Motorisierten Individualverkehr (oben: schnellste Route; unten: kürzere Alternativroute)

Hier sind im Datenmodell höhere Geschwindigkeiten hinterlegt, als auf dem nachgeordneten Netz.

Die momentane Geschwindigkeit auf einzelnen Streckenabschnitten ist in der Realität eine dynamische Größe. So können Verkehrsteilnehmer z.B. nachts auf einem Streckenabschnitt völlig ungehindert fahren. In der morgendlichen Spitzenstunde dagegen kann es zu Staus kommen, die zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit in diesem Streckenabschnitt führen. Anbieter von Datenmodellen kategorisieren die Geschwindigkeiten gemäß der Straßennetzklassifikation. So werden beispielsweise Bundesstrassen innerhalb bebauter Gebiete pauschal mit einer Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h im Modell hinterlegt. Routingdienste nutzen diese Informationen, um eine Streckenauswahl zwischen einem Startort und einem Zielort zu berechnen. Eine zeitlich variable Anpassung der Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Verkehrslage wird dabei nicht durchgeführt. Das Resultat der Routenberechnung ist daher ein Idealbild einer ungestörten Route im Straßennetz, das in den seltensten Fällen der Realität entspricht.

In dem in **Bild 2-2** dargestellten Beispiel treten vor allem in der morgendlichen Spitzenstunde auf den Streckenabschnitten der „schnellsten Route“ häufig Verkehrsüberlastungen auf. Diese Ereignisse können durch eine Veränderung des Streckenattributs „Geschwindigkeit“ bei der Routenberechnung berücksichtigt werden. Es ist wahrscheinlich, dass dann die im Beispiel „kürzere Alternativroute“ auch als schnellste Route berechnet wird.

Ein Beispiel einer Routenberechnung im Motorisierten Individualverkehr in Darmstadt zeigt **Bild 2-2**. Im oberen Teil des Bildes wird das Ergebnis der Routenberechnung mit dem Kriterium „schnellste Route“ gezeigt. Die Fahrzeit beträgt 10 Minuten, die Streckenlänge ist 4,5 Kilometer. Im unteren Teil des Bildes wird das Ergebnis der Alternative dargestellt. Die Fahrt dauert hier 14 Minuten, die Streckenlänge beträgt 4,0 Kilometer. Es wird eine andere Route gefahren als die im oberen Bild. An diesem Beispiel wird deutlich, dass die kürzere Route nicht zugleich die schnellste Route ist. Dies liegt an den unterschiedlichen Streckenattributen „Geschwindigkeit“.

Im oberen Beispiel befindet sich der Hauptanteil der Route auf dem übergeordneten Straßennetz (Bundesstraße).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass im Motorisierten Individualverkehr je nach Tageszeit unterschiedliche momentane Geschwindigkeiten für einzelne Streckenabschnitte in Geschwindigkeitsganglinien erfasst werden müssen.

2.2.3 Fahrplanauskunft im Öffentlichen Verkehr

Die Routenberechnung im Öffentlichen Verkehr basiert auf den hinterlegten Fahrplänen von Bussen und Bahnen. Jedes ÖV-Fahrzeug wird mit seinen Abfahrtszeiten an den zur jeweiligen Linie zugeordneten Haltestellen im Datenmodell hinterlegt. Es entsteht so ein recht komplexes Datenmodell, in dem zusätzlich die Umsteigemöglichkeiten durch die Abschätzung der Umsteigezeiten berücksichtigt werden. Bei einer Fahrplanauskunft muss der Reisende, wie auch bei der Navigation im Pkw, Startort und Zielort eingeben. Die Eingabe kann entweder durch die Angabe der Haltestellennamen oder der Straßennamen mit Hausnummer durchgeführt werden. Außerdem ist die gewünschte Abfahrtszeit bzw. Ankunftszeit anzugeben. Die Berechnung der optimalen Verbindungsauskunft für die eingegebene Relation wird unter Berücksichtigung der persönlichen Präferenzen (schnellste oder kostengünstigste Route, Wahl bestimmter ÖV-Verkehrsmittel wie z.B. Bus, Regionalbahn, Fernverkehrszug) durchgeführt. Ein Beispiel einer Fahrplanauskunft in Darmstadt zeigt **Bild 2-3**.

Ihre Anfrage

Von Darmstadt, Robert-Bosch-Str. 7 Datum Mo, 31.10.05 Zeit 09:23 (Abfahrt)
 Nach Darmstadt Luisenplatz **Quelle: www.rmv.de**

► Anfrage ändern ► Neue Anfrage

Übersicht « früher | später » ?

Details	Bahnhof/Haltestelle	Weg/Karte	Datum	Zeit	Dauer	Ums.	Produkte	Tarif*
<input checked="" type="checkbox"/>	Darmstadt Maria-Goeppert-Straße Darmstadt Luisenplatz	Fußweg 6 Min. Umgebungskarte	31.10.05	ab 09:25 an 09:31	0:12	0		1,30 € 0,80 €
<input checked="" type="checkbox"/>	Darmstadt Berliner Allee Darmstadt Luisenplatz	Fußweg 12 Min. Umgebungskarte	31.10.05	ab 09:35 an 09:39	0:16	0		1,30 € 0,80 €
<input checked="" type="checkbox"/>	Darmstadt Berliner Allee Darmstadt Luisenplatz	Fußweg 12 Min. Umgebungskarte	31.10.05	ab 09:38 an 09:41	0:15	0		1,30 € 0,80 €

* Preise für Einzelfahikarten Erwachsene/Kinder. Bitte beachten Sie: Lokale Regelungen können zu Fahrpreisabweichungen führen. Preisinformationen zum Übergangstarif RMV/RNN erhalten Sie über die RMV-Tarifauskunft.

Detailsansicht ?

Bahnhof/Haltestelle	Datum	an	ab	Produkte	Bemerkungen
Darmstadt, Robert-Bosch-Str. 7	31.10.05			Fußweg	6 Min.
Darmstadt Maria-Goeppert-Straße					
Darmstadt Maria-Goeppert-Straße		09:25		Tram 9	Niederflurstraßenbahn Richtung: Darmstadt Böllenfalltor
Darmstadt Luisenplatz		09:31			9 alternative Abfahrten (mit Niederflurstraßenbahn, alle 15 Minuten)

Dauer: 0:12; Verbindung besteht: Mo - Fr

Bild 2-3: Beispiel einer Fahrplanauskunft in Darmstadt (Quelle: www.rmv.de)

Das Beispiel zeigt ein relativ einfaches Ergebnis der Fahrplanauskunft ohne Umsteigevorgänge. Im Datenmodell können Detailinformationen abgefragt werden. Hierzu gehören die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der gewählten Verbindung. Ein Beispiel hierzu zeigt **Bild 2-4**. Die dargestellten Abfahrtszeiten beziehen sich auf den Soll-Fahrplan. Mögliche Verspätungen oder Störungen gehen nicht in die Verbindungsauskunft mit ein. Der Reisende möchte aber verstärkt über Echtzeitinformationen bei der Fahrplanauskunft zurückgreifen können. Dies ist vor allem bei Verbindungen mit Umsteigevorgängen wichtig, da ein verpasster Anschlusszug die Reisezeit deutlich erhöhen kann. Werden aufbauend auf einem

Echtzeitdatenmodell im Öffentlichen Verkehr Fahrplanauskünfte gegeben, kann der Reisezeitverlust bei einem verpassten Anschluss deutlich reduziert werden, da der Reisende schnell über Reisealternativen informiert wird.

Ihre Auswahl

Tram 9

31.10.05

Richtung: Darmstadt Böllenfalltor

Quelle: www.rmv.de

▶ Neue Anfrage

▶ Zurück

Druckansicht

Route

	Halt	Ankunft	Abfahrt
●	Griesheim Platz Bar-le-Duc		09:15
◇	Griesheim Hans-Karl-Platz/Am Markt	09:16	09:16
◇	Griesheim Wagenhalle	09:17	09:18
◇	Griesheim Kantstraße	09:18	09:19
◇	Griesheim Sankt Stephan	09:20	09:20
◇	Griesheim Flughafenstraße	09:21	09:21
◇	Darmstadt Otto-Hesse-Straße	09:23	09:23
◇	Darmstadt Waldfriedhof	09:24	09:24
▶◇	Darmstadt Maria-Goeppert-Straße	09:25	09:25
◇	Darmstadt Mozarturm	09:26	09:26
◇	Darmstadt Berliner Allee	09:28	09:28
◇	Darmstadt Rhein-/Neckarstraße	09:29	09:30
◀◇	Darmstadt Luisenplatz	09:31	09:32

Echtzeitfahrplanauskunft:
Anpassung gemäß tatsächlicher
bzw. prognostizierter Abfahrtszeiten

Bild 2-4: Detailinformationen einer Fahrplanauskunft im Öffentlichen Verkehr mit Ankunftszeit und Abfahrtszeiten an Haltestellen (Soll-Fahrplan).

Eine wichtige Voraussetzung für Echtzeitfahrplanauskünfte ist die möglichst flächendeckende Erfassung von Fahrzeugen des Öffentlichen Verkehrs. Zur Fahrplanauskunft ist es ausreichend, wenn die tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten erfasst und daraus Prognosen für die nachfolgenden Haltestellen hinsichtlich der Abfahrtszeiten abgeleitet werden. Diese Informationen sind für Mobilitätsdienste bereitzustellen.

2.3 Datenerfassung Motorisierter Individualverkehr

2.3.1 Kennwerte und Detektionsmöglichkeiten im fließenden Verkehr – stationäre Datenerfassung

Ziel der stationären Datenerfassung ist es, die Verkehrszustände in einem bestimmten Streckenabschnitt zu ermitteln. Aufbauend auf der Datenanalyse werden Steuerungsentscheidungen getroffen. In den meisten Fällen wird bislang ausschließlich eine punktuelle Datenerfassung durchgeführt. Aus den gewonnenen Daten ist es oftmals nicht möglich, flächendeckend eine Aussage zur Qualität des Verkehrsablaufs zu treffen. Im Innerortsbereich werden verkehrliche Kenngrößen i.d.R. für die Steuerung von Lichtsignalanlagen ermittelt. Hierzu gehören nach den „Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)“ [FGSV, 1992]:

Kenngröße	Kennung	Einheit
Zeitlücke	Δt	[s]
Verkehrsstärke	q	[Kfz/Zeitintervall]
Belegungszeit	B	[s]
Anwesenheit (An- und Abmeldung)	-	[s]
Mittlere Geschwindigkeit (selten)	\bar{v}	[km/h]

Tabelle 2-1: Verkehrliche Kenngrößen an LSA im innerstädtischen Straßennetz [FGSV, 1992]

Für eine verkehrsabhängige Steuerung der LSA ist die Ermittlung der mittleren Geschwindigkeiten nicht erforderlich. Vielmehr sind dies Zusatzinformationen, die Rückschlüsse auf die Qualität des Verkehrsablaufs erlauben. In den meisten Fällen kommen an LSA Detektoren zum Einsatz, die keine Geschwindigkeiten erfassen.

Für Steuerungszwecke im Außerortsbereich sollen nach den Vorgaben der Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen – TLS [BAST, 2002] fahstreifenbezogen und in 1-Minutenintervallen folgende lokale Kenngrößen erfasst werden:

Kenngröße	Kennung	Einheit
Verkehrsstärke Kfz	q_{Kfz}	[Kfz/h]
Verkehrsstärke Lkw	q_{Lkw}	[Lkw/h]
Mittlere Geschwindigkeit Pkw	\bar{v}_{Pkw}	[km/h]
Mittlere Geschwindigkeit Lkw	\bar{v}_{Lkw}	[km/h]

Tabelle 2-2: Verkehrliche Kenngrößen im Außerortsbereich [BAST, 2002]

Die Zuverlässigkeit der Daten in Bezug auf externe Einflüsse ist stark von der eingesetzten Sensortechnologie abhängig. Bei Induktionsschleifendetektoren sind die externen Einflüsse, abgesehen von Verschleißerscheinungen, gering. Fehlerhafte Werte und Ausreißer müssen identifiziert und herausgefiltert werden. Die verbleibenden Messwerte sind anschließend in ein statistisches Modell zu überführen, das eine zuverlässige Schätzung und darüber hinaus eine Prognose der gesuchten Zustands- bzw. Kenngrößen ermöglicht.

Im innerstädtischen Verkehrsnetz werden nach **LEHNHOFF [2005]** Zählwerte durch Detektoren selten mit einer guten Qualität erfasst. In einer Untersuchung wurden 50 Detektoren an Lichtsignalanlagen einer detaillierten Qualitätsprüfung unterzogen. Ein Drittel der untersuchten Detektoren lieferten Abweichungen von 60% des tatsächlich gezählten Verkehrsaufkommens. Bei nur einem Drittel der untersuchten Detektoren lag die Genauigkeit bei über 90%. Es haben sich vier verschiedene Fehlertypen gezeigt, die zeitlich begrenzt oder während der gesamten Untersuchungsdauer auftraten:

1. Es werden zusätzliche Fahrzeuge benachbarter Fahrstreifen gezählt.
2. Es werden zusätzlich passierende Stadtbahnen als mehrere Fahrzeuge gezählt.
3. Es werden nicht alle Fahrzeuge sondern nur ein bestimmter Prozentanteil gezählt.
4. Es werden nicht existente Fahrzeuge gezählt.

Stationäre Erfassungseinrichtungen sind grundsätzlich geeignet, Kriterien des Verkehrsflusses zu erfassen. Vor allem die auf Autobahnen eingesetzten Detektoren mit Geschwindigkeitsmessungen eignen sich gut für eine Nutzung innerhalb von Verkehrsinformationsdiensten. Da im innerstädtischen Bereich Detektoren in den meisten Fällen zur verkehrsabhängigen Signalsteuerung an Knotenpunkten eingesetzt werden und keine Geschwindigkeiten erhoben werden, ist eine Abschätzung des Verkehrszustands und der mittleren Fahrgeschwindigkeiten in dem Detektor vorgelagerten Streckenabschnitt selten möglich. Wie **LEHNHOFF [2005]** darüber hinaus gezeigt hat, ist die Qualität der durch Detektoren erfassten Kennwerte oftmals gering, so dass eine Plausibilitätsprüfung der mit Detektoren gewonnenen Messwerte besonders sorgfältig durchzuführen ist.

2.3.2 Mobil erhobene Daten / Floating-Car-Data (FCD)

Voraussetzung für den Betrieb von Verkehrsinformationsdiensten ist die Erfassung von aktuellen und zuverlässigen Daten. Diese Voraussetzung ist in weiten Teilen des Verkehrsnetzes nicht zufrieden stellend gegeben. Der flächendeckende Einsatz stationärer Erfassungseinrichtungen ist kostenintensiv. In den vergangenen Jahren wurde daher die fahrzeuggenerierte Verkehrsdatenerfassung entwickelt. Diese Erfassungsmethode wird unter dem Begriff *Floating-Car-Data* (FCD) zusammengefasst. Dabei dienen Fahrzeuge, die im Verkehrsstrom mitschwimmen, als mobile Datenquellen und übermitteln ihre Informationen an zentrale Systeme zur Weiterverarbeitung. Zur Datenerhebung werden fahrzeugseitige Sensoren wie Geschwindigkeitsmesser, Odometer, Drehraten-Sensor etc. genutzt. Darüber hinaus werden auch satellitengestützte Ortungsverfahren eingesetzt. Insbesondere ist hier das Global-Positioning-System (GPS) zu nennen, das in den USA für militärische Zwecke entwickelt wurde, dass aber auch zivile Nutzungen erlaubt. Da Genauigkeit, Verfügbarkeit

und Zuverlässigkeit der einzelnen Sensoren sehr unterschiedlich ist, werden die Sensordaten fusioniert und durch entsprechende Algorithmen fehlerbereinigt. Aus den so gewonnen Sensordaten mehrerer getrennter Fahrten lassen sich für einen Streckenabschnitt mit den jeweiligen Streuungsmaßen nach **HUBER [2001]** die folgenden Verkehrskenngrößen ermitteln:

- **Mittlere Fahrzeit und mittlere (momentane) Fahrgeschwindigkeit**

Die Berechnung der mittleren Fahrzeit und der Fahrgeschwindigkeit wird auf Basis mehrerer unabhängiger Einzelmessungen durchgeführt. Die Kenngrößen errechnen sich aus dem Mittelwert aller Einzelmessfahrten.

- **Haltezeit**

Die Haltezeit wird immer dann erfasst, wenn das Fahrzeug im Verkehrsnetz z.B. vor einer Lichtsignalanlage oder im Stop&Go-Verkehr anhalten muss. Die Haltezeit auf einem Streckenabschnitt ist die Summe der Stillstandzeiten.

- **Zeitverluste**

Die Zeitverluste können als Maß für die Bewegungsgüte eines Fahrzeugs im Verkehrsablauf herangezogen werden. Der Zeitverlust errechnet sich aus der Differenz zwischen dem Zeitpunkt, zu dem das Fahrzeug einen bestimmten Querschnitt erreicht hätte, wenn es nicht aufgehalten worden wäre, und dem Zeitpunkt des Erreichens desselben Querschnitts infolge einer Störung.

Kenngröße	Kennung	Einheit
Mittlere Fahrzeit	\bar{T}_j	[min]
Mittlere Fahrgeschwindigkeit	$\bar{v}_{R,j}$	[km/h]
Haltezeit auf Streckenabschnitt	HZ	[s]
Zeitverlust auf Streckenabschnitt	STRCZ	[min]

Tabelle 2-3: Verkehrliche Kenngrößen fahrzeuggenerierter Daten (angelehnt an **HUBER [2001]**)

Es gibt unterschiedliche methodische Ansätze bei der Erfassung und Aufbereitung von Floating-Car-Data. Diese sind in zwei Kategorien zu unterteilen:

Erfassung von Parametern des Verkehrsflusses

Beschreibung

Bei diesen Verfahren wird die aktuelle Position und Geschwindigkeit im Fahrzeug erfasst und für weitere Auswertungen an die Zentrale übertragen. Dadurch wird es möglich, eine relativ genaue Abbildung der Fahrgeschwindigkeiten auf einzelnen Streckenabschnitten durchzuführen. Entscheidend hängt die Qualität der Datenerfassung von der Übertragungshäufigkeit von Bewegungsdaten der Erfassungseinheit im Fahrzeug an die Verkehrsrechnerzentrale ab. Um die Kommunikationskosten zu minimieren, werden daher unterschiedliche Verfahren eingesetzt, um die Bewegungsdaten zu reduzieren und Informationen zu definierten Zeitpunkten oder Situationen zu übertragen. Zentralenseitig kann eine detaillierte statistische

Analyse der von unterschiedlichen mobilen Endgeräten eingehenden Bewegungsinformationen durchgeführt werden. Für einzelne Streckenelemente kann die Fahrgeschwindigkeit abgebildet werden.

Bewertung

Diese Verfahren eignen sich besonders gut für die wahrheitsgetreue Abbildung der Verkehrslage im Straßennetz, da in regelmäßigen Abständen Bewegungsdaten mobiler Endgeräte an eine Zentrale übertragen werden. Nachteil dieses Verfahrens ist ein umfangreicher Datentransfer zwischen Endgerät und Zentrale. Bis vor kurzer Zeit waren die Kommunikationskosten daher sehr hoch. Mittlerweile bieten Mobilfunkunternehmen günstige Verträge an, die ein monatliches Übertragungsvolumen beinhalten (Volumentarife).

Diese Art der FCD-Verfahren wird derzeit selten eingesetzt.

Erfassung definierter Verkehrssituationen bzw. Ereignisse (meldungsorientierte Verfahren):

Beschreibung

Bei diesen Verfahren wird die vom Fahrzeug aktuell gefahrene Geschwindigkeit auf einzelnen Streckenabschnitten mit einer in Datenbanken hinterlegten Referenzgeschwindigkeit verglichen. Treten signifikante Abweichungen der aktuellen Geschwindigkeit von der Referenzgeschwindigkeit auf, ist dies ein Anzeichen für eine Verkehrsstörung. Diese Verkehrsstörung wird dann an eine Verkehrszentrale vom mobilen Endgerät übertragen.

Bewertung

Es findet zentralenseitig keine vollständige Abbildung der tatsächlich in einzelnen Streckenabschnitten momentanen Geschwindigkeiten statt. Es kommt nur dann zu einer Veränderung der Datenmodelle, wenn im Fahrzeug eine Abweichung von der Referenzgeschwindigkeit detektiert wird. Der Definition der Referenzgeschwindigkeit kommt daher eine besonders große Bedeutung zu. Standardmäßig werden in den Datenmodellen Geschwindigkeiten hinterlegt, die pauschal aus den Straßenkategorien abgeleitet sind. Diese entsprechen selten den tatsächlich in den betrachteten Streckenabschnitten momentanen Geschwindigkeiten. Am ehesten können diese Verfahren auf Autobahnen eingesetzt werden, wo die pauschale Angabe der Referenzgeschwindigkeit (z.B. Geschwindigkeit mindestens 80 km/h) in den meisten Fällen als Vergleichsmaß genutzt werden kann. Im innerstädtischen Bereich sind die Einflussfaktoren auf die Wahl der Geschwindigkeit sehr viel größer, da sich beispielsweise die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge an Lichtsignalanlagen kurzfristig ändern können. Ein Vorteil dieser Verfahren liegt in den relativ geringen Meldungsübertragungen bei ungestörten Verkehrsnetzen.

Nachfolgend werden unterschiedliche Verfahren der Datengewinnung mittels FCD beschrieben. Es handelt sich dabei um wichtige Beispiele von FCD-Projekten, die in einigen Ballungsräumen (nicht nur in Deutschland) zur Anwendung kommen. Eine weiterführende Auflistung von FCD-Projekten ist in **Anlage 9.6** beigefügt.

Bei der folgenden Beschreibung der FCD-Verfahren werden die Vor- und Nachteile herausgearbeitet, um darauf aufbauend den Handlungsbedarf für weitere Entwicklungen des FTD-Verfahrens für den Motorisierten Individualverkehr ableiten zu können.

Global Automotive Telematics Standard (GATS)

Beschreibung

Unter der Bezeichnung GATS wurde Ende der 80er Jahre von den Firmen Mannesmann Autocom und Tegarom Telematics ein de facto-Standard der bidirektionalen Verkehrstelematikdienste für eine formalisierte Kommunikation zwischen Dienste-Anbietern und Verkehrsteilnehmern entwickelt. Dieser Standard wurde vor allem für den Außerortsbereich definiert. Dabei sind Fahrzeuge mit Positionierungssystemen ausgestattet, die ihre Daten via Mobilfunk an eine Verkehrszentrale senden [BUSCH, 2004-2]. Diese Norm beruht auf on-board implementierten Stauerkennungsalgorithmen. Dabei wird eine parametrierbare Referenzgeschwindigkeit v zu Grunde gelegt, bei deren Unterschreitung mit einer Karenzzeit t eine Staumeldung ausgelöst wird. Die Definition der Referenzgeschwindigkeit resultiert aus den im Datenmodell hinterlegten Fahrgeschwindigkeiten, die standardmäßig von den Datenbankherstellern zur Verfügung gestellt werden. Um die Kommunikationskosten zu minimieren, werden die Daten ereignisorientiert versendet, wenn sich eine signifikante Änderung der Verkehrssituation ergibt. Zentralenseitig wird aus den eingehenden Daten eine Verkehrsmeldung nach dem RDS-TMC-Standard erzeugt, die auch in Routenberechnungen mit einfließen kann. Solche Systeme werden heute im Wesentlichen von der DDG Gesellschaft für Verkehrsdaten mbH und von einigen Automobil-Herstellern eingesetzt und haben den Focus in der Datenerfassung auf Bundesfernstraßen.

Bewertung

Das fahrzeugseitige Verfahren generiert immer dann Verkehrsmeldungen, wenn Abweichungen der tatsächlichen in einem Streckenabschnitt gefahrenen Geschwindigkeit von den Referenzdaten festgestellt werden. Die Referenzgeschwindigkeiten werden aus den Straßenkategorien pauschal hergeleitet. Diese Werte orientieren sich an den zulässigen Geschwindigkeiten bzw. den Richtgeschwindigkeiten. Sie entsprechen selten den real gefahrenen Geschwindigkeiten. Wird ein Stau im Endgerät festgestellt, kommt es zur Übertragung der Staumeldung an die Zentrale. Für Informations- und Routingdienste werden zentralenseitig wiederum die Geschwindigkeitswerte pauschal für diesen Streckenabschnitt reduziert. Die momentanen Geschwindigkeiten werden nicht hinterlegt. Die Kommunikation erfolgt per SMS, was recht hohe Betriebskosten verursachen kann. Die tatsächlich in einem Streckenabschnitt gefahrene Geschwindigkeit kommt nicht zur Auswertung.

City-FCD

Beschreibung

Ein weiterer Ansatz der Floating-Car-Data wurde im Projekt WAYflow – des Forschungsprogramms "Mobilität in Ballungsräumen" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung – in der Region Frankfurt RheinMain entwickelt. Dabei lag der Focus in der Verkehrslageerfassung in innerörtlichen Verkehrsnetzen [LEHMANN, 2001]. Bei diesem FCD-Ansatz findet eine segmentbezogene Analyse der Geschwindigkeiten statt. In Schwachverkehrszeiten (nachts) wurden für das innerstädtische Netz der Stadt Frankfurt am Main Referenzgeschwindigkeiten durch Testfahrten ermittelt. Es wurde dabei die Annahme getroffen, dass die Fahrten in einem Netz mit geringer Verkehrsdichte durchgeführt wurden. Diese Referenzdatenbank wurde anschließend im Fahrzeug hinterlegt. Im eigentlichen FCD-Feldversuch wurden immer dann Verkehrsmeldungen generiert, wenn die aktuell gefahrene Geschwindigkeit auf einem Streckenabschnitt signifikant von der Referenzgeschwindigkeit im unbelasteten Netz abgewichen ist. Die im Fahrzeug generierten Abweichungen der gefahrenen Geschwindigkeit von der Referenzgeschwindigkeit werden per SMS an eine Verkehrszentrale übermittelt.

Das entwickelte Verfahren kommt innerhalb des Projekts „Integriertes Verkehrsmanagement Niedersachsen (IVN)“, in der Verkehrszentrale MOVE in Hannover sowie in Athen (Ausstattung von Bussen während der olympischen Sommerspiele 2004) zum Einsatz.

Bewertung

Die segmentbezogene Analyse der aktuell gefahrenen Geschwindigkeiten setzt die Bildung einer Referenzdatenbasis voraus, die durch Testfahrten im unbelasteten Netz durchgeführt wurde. Die Strecken wurden nur einmalig befahren, wodurch bereits kleine Einflüsse wie Standzeiten an LSA die Referenzbildung beeinflussen. Die Kommunikation erfolgt per SMS, was hohe Betriebskosten verursacht.

Taxi-FCD

Beschreibung

Ein weiterer Ansatz eines FCD-Verfahrens wurde vom Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt. Der Ansatz dabei ist die Nutzung von Dispositionssystemen von Taxi-Flotten [DLR, 2005]. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Nutzung des Betriebsfunks der Taxi-Zentralen, wodurch die Kommunikationskosten sehr gering sind. Die Aktualisierungsintervalle hängen vom Betriebszustand des Taxis ab. So melden frei verfügbare Fahrzeuge z.B. alle 40 Sekunden ihre Position, während besetzte Taxis nur alle 180 Sekunden eine Meldung absetzen. Aus den Positionsdaten der Taxis werden zentralenseitig Wegeketten gebildet. Anschließend werden aus den einzelnen Wegpunkten durch die Verwendung von Routingverfahren mögliche gefahrene Routen berechnet. Meist gibt es dabei mehrere Möglichkeiten der Wegekettenbildung, deren Zutreffenswahrscheinlichkeit nicht nur von der Weglänge, sondern auch von Faktoren wie z.B. Straßenkategorie, zulässige Geschwindigkeit, Anzahl der passierten Lichtsignalanlagen o.ä. abhängt. Aus den zurückgelegten Weglängen zwischen zwei Meldepunkten und der übertragenen Zeitdifferenz kann die mittlere Fahrgeschwindigkeit errechnet werden. Bei dieser Berechnung muss berücksichtigt werden, dass Taxis teilweise berechtigt sind, Strecken und Fahrstreifen zu nutzen, die für andere Fahrzeuge nicht freigegeben sind. Die Geschwindigkeiten sind somit nicht immer repräsentativ.

Der DLR-Ansatz findet Anwendung in Berlin, Graz, Hamburg, München, Nürnberg (Ausstattung von 500 Taxen), Stuttgart, Wien.

Bewertung

Vorteil des Verfahrens liegt in den geringen Kommunikationskosten, da der Taxi-Betriebsfunk genutzt wird. Die in Zeitintervallen von 40 Sekunden (freies Taxi) bzw. 180 Sekunden (besetztes Taxi) übertragenen Positionsdaten ergeben keine vollständige Abbildung der zurückgelegten Strecke. Die zentralenseitig abgelegten Routingverfahren berechnen die mögliche Strecke auf Basis der Messpunkte, was zu Ungenauigkeiten führen kann.

DIANA

Beschreibung

Das Pilotprojekt DIANA (Dynamic Information And Navigation Assistance) ist im Auftrag der Hessischen Landesregierung in der Region Frankfurt RheinMain seit Februar 2005 in einer Testphase. Die Aktivitäten sind in das Modellprojekt "Staufreies Hessen 2015" eingebunden. Zunächst beteiligen sich an dem Pilotprojekt ca. 100 Fahrzeuge der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung (HSVV), die mit einem Smartphone samt Navigationssystem und einer FCD-Navigationstechnik ausgerüstet sind. Diese leiten Informationen zur Verkehrslage an die hessische Verkehrszentrale weiter. Die so gewonnen Verkehrsdaten werden in der Zentrale zu Verkehrsmeldungen aufbereitet und an die FCD-Navigationssysteme im Fahrzeug weitergeleitet.

Nachdem eine Strecke durch das Navigationssystem errechnet wurde, wird die erwartete Fahrzeit mit der tatsächlichen Fahrdauer verglichen, und die Abweichungen werden automatisch an die Verkehrszentrale übermittelt [HESSEN, 2005].

Um die Aktualität der Daten im Hinblick auf die sich ändernde Verkehrslage sicherzustellen, kommt ein Update-Verfahren zum Einsatz, bei dem in regelmäßigen Abständen bei der Servicezentrale angefragt wird, ob neue Verkehrsmeldungen für die betreffende Strecke vorliegen. Die Routenführung erfolgt so über die gesamte Strecke unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrslage [PTV, 2005].

Bewertung

Für den DIANA-Ansatz gibt es derzeit keine weiterführenden Fachveröffentlichungen, die das eigentliche FCD-Verfahren näher erläutern. DIANA legt den Focus auf die Datenerfassung auf Autobahnen. Es handelt sich nach bisherigen Erkenntnissen um eine meldungsorientierte Übertragung von Verkehrsdaten. Immer dann, wenn eine Abweichung von einer Geschwindigkeit im ungestörten Streckennetz detektiert wird, erfolgt eine Störungsmeldung an die Zentrale. Inwieweit Plausibilitätsprüfungen und die Durchdringungsrate in die Beurteilung der Verkehrslage mit eingehen, kann nicht beantwortet werden. Eine abschließende Bewertung ist daher noch nicht möglich.

Tabelle 2-4 fasst die wesentlichen Elemente der hier beschriebenen FCD-Projekte und Verfahren zusammen.

	GATS DDG	City-FCD Gedas Telematics	Taxi-FCD DLR	DIANA PTV
Positions- bestimmung	GPS + fahrzeugseitige Sensoren	GPS	GPS	GPS
Kartenhaltung	Im Fahrzeug	Im Fahrzeug	Zentralenseitig	Im Fahrzeug
MapMatching	Im Fahrzeug	Im Fahrzeug	Zentralenseitig	Im Fahrzeug
Kommuni- kation	GSM / SMS	GSM / SMS	Taxi-Funk (kostenlos)	GSM / GPRS
Verkehrslage	Erfassung definierter Verkehrssituationen; Fahrzeugseitige Überprüfung; bei Abweichung von Normalzustand wird ein Übertragungsimpuls zur Zentrale ausgelöst.	Erfassung definierter Verkehrssituationen; Fahrzeugseitige Überprüfung; bei Abweichung von Normalzustand wird ein Übertragungsimpuls zur Zentrale ausgelöst.	Erfassung von Parametern des Verkehrsflusses (Geschwindigkeit); Zentralenseitige Überprüfung. Berechnung eines Level-of-Service (FCD).	Erfassung definierter Verkehrssituationen; Fahrzeugseitige Überprüfung; bei Abweichung von Normalzustand wird ein Übertragungsimpuls zur Zentrale ausgelöst.
Geschwindig- keitsreferenz	Geschwindigkeitsdifferenzierung durch Straßenkategorien.	Bildung von Referenzgeschwindigkeiten durch Testfahrten in Schwachverkehrszeiten.	Geschwindigkeitsdifferenzierung durch Straßenkategorien.	Unbekannt
Verkehrsmeldung	RDS/TMC – Meldung aus Einzelereignissen.	Meldung aus Einzelereignissen.	Keine; Level-of-Service-Berechnung aus Geschwindigkeit.	RDS/TMC – Meldung aus Einzelereignissen.
Bewertung	Für innerstädtische Betrachtungen ungeeignet.	Für innerstädtische Betrachtungen geeignet. Tatsächliche Geschwindigkeiten werden nicht übertragen. Nur Verkehrsmeldungen	Die Geschwindigkeiten werden auf Basis vereinzelter Positionen durch zentralenseitige Routingverfahren berechnet → Ungenauigkeiten	Auf Grund fehlender technischer Details kann keine Bewertung vorgenommen werden.

Tabelle 2-4: Gegenüberstellung ausgewählter Floating-Car-Data-Verfahren

2.3.3 Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs

Die Beschreibung des zeitlich-räumlichen Verkehrszustands auf Strecken ist einerseits die Grundlage zur Erstellung eines Verkehrslageberichts, andererseits auch notwendige Basis für die Verfahren der Verkehrsprognose sowie der netzbezogenen Datenfusion und Steuerung. Bei der Beschreibung des Verkehrszustands wird im Wesentlichen zwischen einer Kategorisierung der gemessenen Verkehrskenngrößen und dem Einsatz von Modellen zur Beschreibung des Verkehrszustands unterschieden.

Ein Verfahren zur Beschreibung des Verkehrszustands wird im *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS) [FGSV, 2001] vorgestellt. Danach wird in Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (LOS, Level-Of-Service) unterschieden:

- LOS A: Die Verkehrsteilnehmer werden äußerst selten von anderen beeinflusst. Sie besitzen die gewünschte Bewegungsfreiheit in dem Umfang, wie sie auf der Verkehrsanlage zugelassen ist. Der Verkehrsfluss ist frei.
- LOS B: Die Anwesenheit anderer Verkehrsteilnehmer macht sich bemerkbar, bewirkt aber nur eine geringe Beeinträchtigung der Einzelnen. Der Verkehrsfluss ist nahezu frei.
- LOS C: Die individuelle Bewegungsfreiheit hängt vielfach vom Verhalten der übrigen Verkehrsteilnehmer ab. Die Bewegungsfreiheit ist spürbar eingeschränkt. Der Verkehrszustand ist stabil.
- LOS D: Der Verkehrsablauf ist gekennzeichnet durch hohe Belastungen, die zu deutlichen Beeinträchtigungen in der Bewegungsfreiheit der Verkehrsteilnehmer führen. Interaktionen zwischen ihnen finden nahezu ständig statt. Der Verkehrszustand ist noch stabil.
- LOS E: Es treten ständig gegenseitige Behinderungen zwischen den Verkehrsteilnehmern auf. Bewegungsfreiheit ist nur in sehr geringem Umfang gegeben. Geringfügige Verschlechterungen der Einflussgrößen können zum Zusammenbruch des Verkehrsflusses führen. Der Verkehr bewegt sich im Bereich zwischen Stabilität und Instabilität. Die Kapazität ist erreicht.
- LOS F: Die Nachfrage ist größer als die Kapazität. Die Verkehrsanlage ist überlastet.

Die Zuordnung zu den Qualitätsstufen kann über verschiedene verkehrliche Kennwerte erfolgen. Durch diese Vorgehensweise wird es möglich, eine einheitliche Bewertung von Verkehrszuständen mit unterschiedlichen verkehrlichen Kennwerten vorzunehmen. Schwerpunktartig wird die Klassifizierung im Motorisierten Individualverkehr durchgeführt. Je nach Verkehrsanlage werden im HBS [FGSV, 2001] unterschiedliche Kriterien für die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs herangezogen:

- Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte
Bewertungskriterium: Auslastungsgrad [%]
- Planfreie Knotenpunkte
Bewertungskriterium: Auslastungsgrad [%]
- Zweistreifige Landstraßen
Bewertungskriterium: Verkehrsdichte [Kfz/km]
- Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage:
Bewertungskriterium: mittlere Wartezeit [s]
- Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage:
Bewertungskriterium: mittlere Wartezeit [s]

Während auf Autobahnen und auf anbaufreien Straßen die Qualität des Verkehrsablaufs fast ausschließlich vom Verkehrsaufkommen abhängt, so wird diese bei innerörtlichen Straßen durch die Anzahl der Halte und den Wartezeiten an den Knotenpunkten bestimmt. Weitere Einflussfaktoren sind die Häufigkeit von Ein- und Abbiegevorgängen an untergeordneten Knotenpunkten sowie Halte- und Einparkvorgänge. Das HBS [FGSV, 2001] beschreibt in Kapitel 8 („Streckenabschnitte von Hauptverkehrsstraßen“) einen Ansatz, bei dem die Reisegeschwindigkeit als Maß der Verkehrsqualität dienen kann. Es handelt sich dabei um die „streckenbezogene“ Reisegeschwindigkeit, aus der – ergänzt um die Wartezeiten an Knotenpunkten – die „verbindungsbezogene Reisegeschwindigkeit“ zu berechnen ist. Das HBS weist darauf hin, dass bei der Beurteilung der Verkehrsqualität bislang noch keine gesicherten Erkenntnisse zur Verwendung des Kriteriums „verbindungsbezogene Reisegeschwindigkeit“ vorliegen. Hierzu werden aktuell Forschungsarbeiten durchgeführt.

Auf Autobahnen messen Detektoren die aktuellen Geschwindigkeiten und das Verkehrsaufkommen, aus denen die Verkehrsdichte und mit der Grundkapazität der Auslastungsgrad als Qualitätskriterium errechnet werden können. An innerstädtischen vorfahrtgeregelten und signalgeregelten Knotenpunkten hängt die Berechnung des Qualitätskriteriums „Wartezeit“ von der Erfassung des Verkehrsaufkommens an einzelnen Knotenpunktzufahrten ab. Zur Erfassung des Verkehrs müssten alle Knotenpunktzufahrten mit Detektoren ausgestattet sein, was bei vorfahrtgeregelten Knotenpunkt i.d.R. nicht der Fall ist. Aus dem detektierten Verkehrsaufkommen kann an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten dann die Wartezeit beispielsweise nach [BRILON, 1995] errechnet werden. An Lichtsignalanlagen hängen die Wartezeiten maßgeblich von den Freigabezeiten und dem Verkehrsaufkommen in den Knotenpunktzufahrten ab. Die Wartezeit errechnet sich dann nach [FGSV, 1992].

Die Beispiele zeigen, dass unterschiedliche technische Systeme zur Berechnung der verkehrlichen Bewertungskenngößen heranzuziehen sind. In der vorliegenden Arbeit wird daher der Ansatz verfolgt, eine Bewertung der „verbindungsbezogenen Reisegeschwindigkeit“ vorzunehmen. Dazu werden die Bewegungsspuren der Mobiltelefone fortdauernd ausgewertet und auf einzelne Streckensegmente bezogen. Unabhängig von der betrachteten Verkehrsanlage (Autobahn, innerstädtisches Verkehrsnetz) wird eine Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs durch dieses Erfassungssystem ermöglicht. Eine Herleitung des Bewertungsverfahrens wird in **Kapitel 3.6.5** durchgeführt.

2.4 Datenerfassung Öffentlicher Verkehr

2.4.1 Rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL)

Im Öffentlichen Verkehr werden seit Mitte der 60er Jahre so genannte rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL) eingesetzt. Der Grundgedanke der RBL basiert auf der industriellen Prozessleittechnik: An zentraler Stelle soll ein Überblick über den Einsatz von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs vorhanden sein. Das Personal in der Leitstelle kann dann bei Abweichungen von einem Sollzustand (Fahrplan) durch geeignete Maßnahmen kurzfristig den Ist-Zustand des Betriebsablaufs optimieren und mittelfristig den Soll-Zustand wieder herstellen [VDV, 1995]. Neben diesem ursprünglichen Einsatzziel der RBL haben sich in den vergangenen Jahren Zusatzfunktionen herausgebildet, die sich mittlerweile zum Standard entwickelt haben. RBL unterstützen bei den folgenden Anwendungen:

- **Beeinflussung von Lichtsignalanlagen**

Da die genauen Standorte der Fahrzeuge im RBL bekannt sind, können LSA rechtzeitig bei einer Annäherung von Bussen oder Straßenbahnen auf Grün geschaltet werden, um diesen Fahrzeugen freie Fahrt zu verschaffen. Hierzu wird vom ÖV-Fahrzeug die Annäherung an die LSA an das LSA-Steuergerät gesendet. Anschließend erfolgt die Freigabe der betreffenden Knotenpunktzufahrt.

- **Aktuelle Fahrgastinformationen**

Die Akzeptanz des öffentlichen Verkehrs sinkt deutlich, wenn Verkehrsteilnehmer längere Zeit an einer Haltestelle warten müssen, ohne über die voraussichtliche Ankunftszeit von Bussen und Bahnen informiert zu werden. Durch den Vergleich zwischen aktuellem und dem Soll-Standort der ÖV-Fahrzeuge ist die Berechnung der voraussichtlichen Ankunftszeit an einzelnen Haltestellen möglich. In vielen Städten werden daher Anzeigetafeln installiert, in denen die dynamischen Informationen angezeigt werden. Teilweise bestehen seitens der Verkehrsunternehmen Bedenken bei der Weitergabe von Verspätungsmeldungen für eine verbesserte Fahrgastinformation. Hierdurch könnte eine Auswertung zur Qualität der Beförderungsleistungen des Verkehrsunternehmens erstellt werden.

- **Anschlusssicherung**

Gerade in den Schwachverkehrszeiten im Öffentlichen Verkehr (z.B. in den Nachtstunden) ist für den Verkehrsteilnehmer ein verpasster Anschluss auf Grund einer Verspätung ein zu vermeidendes Erlebnis. Hier bieten RBL-Systeme den Fahrzeugführern eine weitere Hilfestellung, da sich die genaue Ankunftszeit des möglicherweise verspäteten Fahrzeugs abfragen lässt.

- **Störfallmanagement**

In Störfallsituationen unterstützen RBL-Systeme den Disponenten in einer Leitstelle des Verkehrsunternehmens. Es müssen eine Vielzahl von Aktivitäten angestoßen werden, die durch ein RBL automatisiert umgesetzt werden. So können beispielsweise bei der Einrichtung eines Schienenersatzverkehrs Fahrgastinformationen automatisiert auf elektronische Anzeigesysteme an den Haltestellen projiziert werden. Die Fahrer werden automatisch über Bordgeräte mit Informationen versorgt.

Ergänzend dazu besteht die Möglichkeit statistische Auswertungen zu erstellen und fahrzeugautonomen Betrieb und automatische Disposition durchzuführen. Auf diese Aspekte wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Details hierzu sind in [VDV, 1995] dokumentiert.

Technik

Nach [BMVBW, 2005] erfordern Rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL) technische Einrichtungen in der **Leitzentrale**, den **Fahrzeugen** und an **Strecken und Haltestellen**. Es werden Komponenten für folgende Funktionen benötigt:

- Kommunikation (Zentrale ↔ Fahrzeuge),
- Fahrzeugortung,
- Fahrgastinformation,
- Steuerung externer Geräte (Lichtsignalanlagen, Weichen),
- Bedienung und Datenverarbeitung (Fahrzeuge und Zentrale),
- ggf. Besetzungsgraderfassung / Fahrgastzählung,
- ggf. Navigationssysteme (z. B. bei flexiblen Betriebsweisen).

Für die **Kommunikation** (Einweg- und Zweiwege-Kommunikation) kommen Betriebs- und Bündelfunk (analog, zukünftig nur digital), Mobilfunk (GSM, UMTS), digitales Radio (DAB / DMB) und betriebseigene Festnetze zum Einsatz. Unterschiede liegen in den Übertragungsraten und im Aufwand zum Aufbau oder in den Kosten zur Nutzung der Infrastruktur. Besonders in ländlichen Gebieten stellt der Mobilfunk meist eine finanziell tragbare Lösung dar.

Die **Fahrzeugortung** erfolgt i. d. R. mittels einer Kombination unterschiedlicher Verfahren. Konventionelle Verfahren sind die punktuelle Ortung (elektromechanische Kontakte oder induktive Detektoren, Baken), die physikalische Ortung (Wegstreckenzähler) und die logische Ortung (Türöffnung, Analyse der Haltestellenfolge). Daneben gibt es die Möglichkeit der satellitengestützten Ortung (GPS, DGPS und in Zukunft GALILEO) und der zellengestützten Ortung (Mobilfunk). Physikalische Verfahren sind nur bei eindeutiger und verorteter Route einsetzbar. Durch die Kombination der Verfahren wird eine durchgängige Ortung und hohe Genauigkeit sichergestellt.

Für die **Fahrgastinformation** können Anzeigesysteme unterschiedlicher Technologien (Flip-Dot, LED, LCD, TFT u. a.) an Haltestellen oder in Fahrzeugen verwendet werden. Darüber hinaus sind Dienste über Internet, Mobiltelefon, Festnetz-Telefon, Videotext, öffentliche Terminals und Lautsprecher möglich.

Die **Steuerung externer Geräte** erfolgt entweder über elektromechanische Kontakte oder über Funk.

Bedienung und Datenverarbeitung erfolgt im Fahrzeug über Bordrechner mit den zugehörigen Komponenten wie Bedienterminal für den Fahrer, Rechneinheit und Speicher.

Eine **Besetzungsgraderfassung** geschieht durch Wägung des Fahrzeugs mit Sensoren in der Federung und Vergleich mit dem Nettogewicht. Hieraus können nur grobe Anhaltswerte (z.B. leer, mäßig gefüllt, voll) gewonnen werden. Bislang noch mit starken Unsicherheiten behaftet, ist die **Fahrgastzählung**. Trittmatten, Infrarotdetektoren, Lichtschranken oder

Kameras an den Türen erfassen die Fahrgäste beim Betreten und Verlassen des Fahrzeugs. Mit bargeldlosen Zahlungssystemen der dritten Stufe (Anwesenheitserfassung im Fahrzeug, wird eine genaue Fahrgastzählung möglich.

Navigationssysteme können die übrigen Funktionen des Systems ergänzen. Dafür müssen zusätzlich zu den übrigen Informationen geografische Angaben gespeichert werden.

RBL und Fahrgastinformationssysteme können im Aufbau unterschiedlich strukturiert werden. **Zentrale Systeme** sammeln die Daten der Fahrzeuge und bereiten sie auf, bevor sie an die Fahrzeuge zurückgeleitet werden.

Dezentrale Systeme nehmen den Soll- / Ist-Vergleich der Fahrzeugposition im Fahrzeug selbst vor. Einfache Systeme zur Fahrgastinformation und Anschlusssicherung können auch ohne Zwischenschaltung einer Zentrale mit direktem Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen arbeiten. Meist werden **Mischformen** eingesetzt. Der Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Zentrale erfolgt entweder zyklisch oder bei dezentralen Systemen auch anlassbezogen (z. B. bei größeren Störungen).

2.4.2 Schnittstellen zu Datenmodellen im Öffentlichen Verkehr

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) hat 1995 in einer Veröffentlichung ein ÖPNV-Datenmodell vorgestellt, das vielfach von der Industrie aufgegriffen und in rechnergestützten Betriebsleitsystemen integriert wurde.

Gerade in den Themenfeldern der dynamischen Fahrgastinformation sind entsprechende Schnittstellen zu Datenmodellen herzustellen.

Der ÖV-Datenaustausch erfolgt in der Regel unter folgenden Gegebenheiten:

- Daten werden von einem Fremdsystem importiert und exportiert.
- Daten müssen mit marktüblicher Standard-Software nachbearbeitet, inspiziert oder ausgewertet werden (Editor, Tabellenkalkulation, Datenbanken etc.).

Die Beschreibung der Schnittstellen stellt grundsätzlich einen Ausschnitt der wesentlichen Elemente des ÖPNV-Datenmodell dar.

2.4.3 Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs

Im Öffentlichen Verkehr gibt es erste Überlegungen einer Einführung der Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs gemäß einer Definition von Qualitätsstufen. Sie werden in der Praxis bislang allerdings nur selten angewendet. Das *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS) [FGSV, 2001] gibt Hinweise zur Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs im ÖPNV. Danach wird die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs auf einzelnen Streckenabschnitten als Qualitätskriterium genutzt. Die mittlere Geschwindigkeit wird maßgeblich von der Art der Bevorrechtigung der ÖV-Fahrzeuge an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage beeinflusst. Außerdem hängt sie u.a. von der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten betriebsbedingter Störungen an Haltestellen ab. Die mittlere Beförderungsgeschwindigkeit kann in Anlehnung an das HBS wie folgt bewertet werden (vgl. **Tabelle 2-5**).

Kriterium		
Beförderungsgeschwindigkeit von Fahrzeugen des ÖPNV	Qualitätsstufe	Beförderungsgeschwindigkeit $V_{\text{ÖV}}$ [km/h]
	A	≥ 24
	B	≥ 22
	C	≥ 19
	D	≥ 15
	E	≥ 10
	F	< 10

Tabelle 2-5: Qualitätskriterien im Öffentlichen Verkehr (angelehnt an [FGSV, 2001])

2.5 Bewertung

Auf der Grundlage der durchgeführten Literaturrecherche zu bisherigen Detektionsverfahren im Motorisierten Individualverkehr und im Öffentlichen Verkehr ist eine Überprüfung zur Verwendbarkeit der Verfahren hinsichtlich einer flächendeckenden Abbildung des Verkehrsgeschehens durchzuführen.

2.5.1 Motorisierter Individualverkehr

Die nachfolgenden Anforderungen an die Detektionsverfahren im Motorisierten Individualverkehr sind zu erfüllen:

- **Verkehrliche Kennwerte**

Berechnung der mittleren auf einem Streckenabschnitt fahrbaren Geschwindigkeit („momentane Geschwindigkeit“) und des Verkehrsaufkommens.

Alle untersuchten stationären Erfassungsmethoden liefern Aussagen zum Verkehrsaufkommen und zum Belegungsgrad der Detektoren in den jeweiligen Streckenabschnitten. Auf Autobahnen werden zusätzlich Geschwindigkeitsverteilungen erfasst. Vereinzelt werden solche Messeinrichtungen auch auf Bundesstraßen eingesetzt. Im innerstädtischen Bereich werden in den seltensten Fällen Geschwindigkeiten durch stationäre Erfassungseinrichtungen erfasst. Vereinzelt gibt es so genannte „strategische Detektoren“, die

neben dem Verkehrsaufkommen auch mittlere Geschwindigkeiten erheben. Der flächen-deckende Einsatz von Induktionsschleifen würde hohe Investitionen erfordern.

Die Mehrzahl der derzeit eingesetzten Detektoren dienen der Ermittlung des Verkehrsaufkommens in Knotenpunktzufahrten um optimierte, verkehrsabhängige geregelte Grünzeiten an Lichtsignalanlagen schalten zu können.

Die Verkehrsdatenerfassung mittels Floating-Car-Data (FCD) ermöglicht die Ermittlung momentaner Geschwindigkeiten. Das Verfahren ist daher geeignet für die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs (vgl. **Kapitel 2.3.2**).

- **Aktualität der Daten**

Die Daten müssen fortdauernd erhoben und kurzfristig in festgelegten Zeitabständen an eine Verkehrsrechnerzentrale übertragen werden.

Die Erfahrungen zeigen, dass Geschwindigkeiten vor allem auf Autobahnen erfasst und an Verkehrsrechnerzentralen übertragen werden. Im innerstädtischen Bereich werden Detektordaten an verkehrsabhängig geregelten Lichtsignalanlagen ebenfalls zentral erfasst. Diese Anlagen liefern in der Regel nur Zählwerte und Belegungsgrade, aber keine Geschwindigkeiten. In ländlichen Bereichen werden verkehrsabhängige Lichtsignalanlagen eingesetzt, deren Detektordaten ausschließlich im Steuergerät verarbeitet werden und isoliert von benachbarten Anlagen verarbeitet werden. Die Daten werden nicht zentral gespeichert und verarbeitet.

Die Verkehrsdatenerfassung mittels Floating-Car-Data liefert je nach Verfahren in unterschiedlichen Zeitintervallen aktuelle Statusinformationen. Bei dem hier verfolgten Ansatz werden fortdauernd Daten an eine Verkehrsrechnerzentrale übertragen, was eine umfangreiche Analyse des tatsächlichen Verkehrsgeschehens ermöglicht und den Aufbau einer historischen Datenbasis zum Zwecke von Verkehrsprognosen ermöglicht.

- **Zuverlässigkeit der Daten**

Mit der Zuverlässigkeit der Daten wird beschrieben, ob die Daten zeitlich und räumlich konstant erhoben und weitergeleitet werden.

Für die Beurteilung der zeitlichen Konstanz ist einerseits von Bedeutung, ob ein stetiger Datenfluss besteht und andererseits, ob Aggregationsintervalle immer die gleiche Länge haben. Für die räumliche Konstanz ist die Abdeckung des Untersuchungsgebiets essentiell [**EVERS, 2005**].

- **Genauigkeit**

Für die Beurteilung der Genauigkeit ist ein Vergleich der detektierten Daten mit einer vergleichbaren Datenreihe, die mit der Realität gleichgesetzt wird, durchzuführen.

Wie zuvor bereits ausgeführt, ist die Genauigkeit von Detektorwerten aus Induktionsschleifen bisherigen Erkenntnissen zufolge nicht ausreichend. In der von **LEHNHOFF [2005]** durchgeführten Untersuchung hatten ein Drittel der Detektoren Abweichungen des detektierten Verkehrsaufkommens von bis zu 60% zur tatsächlich gezählten Verkehrsmenge.

Verfahren der Floating-Car-Data ermöglichen eine sehr genaue Berechnung segmentbezogener Geschwindigkeiten. Das individuelle Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer (z.B. bewusst langsame Fahrweise) muss durch Plausibilitätsprüfung berücksichtigt werden. Ein hoher Verbreitungsgrad erhöht die Genauigkeit von FCD-Verfahren.

2.5.2 Öffentlicher Verkehr

Im Öffentlichen Verkehr müssen Fahrzeugstandorte im Online-Betrieb erfasst werden, damit Abweichungen vom Soll-Fahrplan erkannt werden können.

Rechnergestützte Verkehrsleitsysteme (RBL) eignen sich in hohem Maße für eine Verwendung der dynamischen Daten innerhalb von Auskunftssystemen des Öffentlichen Verkehrs. Die Fahrzeugstandorte werden im Online-Betrieb erfasst, wodurch zentralseitig eine Verspätungsberechnung einzelner Fahrzeuge durchgeführt werden kann. Leider sind nur sehr wenige Verkehrsunternehmen mit rechnergestützten Betriebsleitsystemen ausgestattet. Bislang werden Echtzeitdaten im Öffentlichen Verkehr selten zur dynamischen Fahrplanauskunft genutzt (vgl. **[RUDY, 2005]**). Alternative Erfassungsmethoden unabhängig von rechnergestützten Betriebsleitsystemen der Verkehrsunternehmen gibt es derzeit nicht.

3 Verfahrensentwicklung

„Floating Traveller Data (FTD)“

3.1 Anforderungen an neue Verfahren

Aufbauend auf den gewonnen Erkenntnissen der bislang eingesetzten Verfahren zur Verkehrsdatenerfassung im Motorisierten Individualverkehr, Öffentlichen Verkehr sowie für Fußgänger und Radfahrer leiten sich die folgenden Anforderungen für neuartige Verfahren ab, die mobile Lotsendienste im Verkehr mit dynamischen Daten versorgen sollen. Dadurch, dass die Verfahren auf handelsüblichen Mobiltelefonen eingesetzt werden sollen, besteht die Möglichkeit, mit einem Endgerätetyp Verkehrsdaten unabhängig von der Verkehrsmittelwahl zu erfassen. Durch die wachsende Anzahl von Mobiltelefonnutzern und die immer leistungsfähigeren Endgeräte können Verkehrsinformationsdienste mit Verfahren der Verkehrsdatenerfassung auf einem Gerät integriert werden. Eine hohe Akzeptanz bei den Kunden würde zu einer hohen Marktdurchdringung führen, wodurch eine flächendeckende Ermittlung der Verkehrslage ermöglicht wird. Der Ausbau der teuren Infrastruktur zur Verkehrsdatenerfassung kann reduziert werden, wenn die Verkehrsdatenerfassung mit mobilen Endgeräten weiter entwickelt und im Markt verankert wird.

Allgemeine Anforderungen

- Damit eine möglichst große Verbreitung der FTD-Verfahren erzielt wird, sollen handelsübliche mobile Endgeräte eingesetzt werden (Mobiltelefone, Smartphones), die abhängig von der Verkehrsmittelwahl des Nutzers Verkehrsdaten (Position, Bewegungsgeschwindigkeit, Uhrzeit) an eine Zentrale übertragen.
- Zur Erfassung von Verkehrsdaten mit Mobiltelefonen ist eine genaue Ortung innerhalb und außerhalb von Gebäuden erforderlich (indoor, outdoor Ortung). Zukünftige Mobiltelefone sind mit entsprechenden Ortungskomponenten auszustatten.
- Für den Nutzer muss die Handhabung sehr einfach sein. Eine vollautomatische Erfassung ohne manuelle Eingaben ist anzustreben.
- Das Datenaufkommen zwischen mobilem Endgerät und Zentrale soll möglichst gering sein, um die Kommunikationskosten zu minimieren.

Anforderungen an Verfahren im Motorisierten Individualverkehr

- Zentralenseitig muss die Berechnung der tatsächlich gefahrenen, momentanen Geschwindigkeiten auf einzelnen Streckenabschnitten ermöglicht werden, da diese für Routingberechnungen erforderlich sind.
- Bei geringem Stichprobenumfang (z.B. Einzelmessung im Straßenabschnitt) sollte es möglich sein, die Plausibilität der eingehenden mobil erhobenen Daten zu überprüfen.

- Auch bei geringer Durchdringungsrate mit mobilen Erfassungsgeräten ist eine Datenbasis in Form von Geschwindigkeitsprofilen aufzubauen. Dadurch kann, je nach Tageszeit, eine Aussage zur mittleren momentanen Geschwindigkeit (Prognosewert) in einzelnen Streckenabschnitten getroffen werden, ohne dass eine Online-Detektion erfolgt.
- Städtische und regionale Verkehrssteuerungsaspekte sollen Berücksichtigung finden, damit der hier verfolgte Ansatz mit einem PPP-Modell umsetzbar wird. Durch diesen Ansatz können gezielt Streckenabschnitte aus der individuellen Routenberechnung ausgeschlossen werden, in dem die zugehörigen Attribute (Geschwindigkeit, Straßenkategorie) verändert werden.
- Die Verfahren sollen auf andere Regionen übertragen werden können.

Anforderungen an Verfahren im Öffentlichen Verkehr

- Da die Verbreitung von rechnergestützten Betriebsleitsystemen vor allem in ländlich geprägten Regionen derzeit noch gering ist, sollte unabhängig von diesen Systemen die Möglichkeit geschaffen werden, mit Mobiltelefonen Standorte von Bussen und Bahnen zu ermitteln. Dabei sind die Nutzer des ÖPNV mit ihren Mobiltelefonen die Datenlieferanten. Darauf aufbauend ist dann ein Vergleich zwischen Sollfahrplan und tatsächlicher Ankunft der Fahrzeuge an den Haltestellen durchzuführen.

Anforderungen an Verfahren für Fußgänger und Radfahrer

- Die Kenntnis über Fußwege und Radwege ist innerhalb von Routingdiensten sehr gering. Es sind daher Verfahren zu entwickeln, die die Erkennung bislang nicht in Datenbanken erfasster Fuß- und Radwege ermöglichen.
- Für Fußgänger und Radfahrer muss keine Aussage zum Verkehrsfluss getroffen werden, da die Fortbewegungsgeschwindigkeit individuell verschieden ist und es selten zu „Staus“ im Fußgängernetz bzw. Radwegenetz kommt.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung von Verfahren zur Datenerfassung und Auswertung im Verkehr, bei denen die zuvor definierten Anforderungen zu berücksichtigen sind. Die Verfahren werden unter dem Begriff der „Floating Traveller Data (FTD)“ zusammengefasst und nachfolgend hergeleitet.

3.2 Funktionaler Ablauf

Ein Ziel der Verfahrensentwicklung der „Floating Traveller Data (FTD)“ ist die verkehrsmittelübergreifende Bereitstellung von Echtzeitdaten für kollektive und individuelle Informationsdienste im Verkehr. Ein besonderer Fokus liegt in der Datenaufbereitung für mobile Lotsendienste im Verkehr. Eine wesentliche Aufgabe der vorliegenden Arbeit liegt in der **Erstellung eines Gesamtkonzepts**, bei dem Verkehrsteilnehmer mit Mobiltelefonen zur Verkehrsdatenerzeugung beitragen. Die Wahl des Verkehrsmittels soll bei der Aktivierung der jeweiligen Verfahren berücksichtigt werden. Die jeweiligen FTD-Verfahren sind in das Gesamtkonzept eingebunden, das sich in die Schwerpunkte

- Datenerfassung,
- Kommunikation,
- Datenanalyse und integriertes Datenmodell,
- Datenaufbereitung,
- Datenfusion,
- Verkehrslage / Qualität des Verkehrsablaufs und
- Verkehrsinformationsdienste

unterteilt. Die FTD-Verfahren sind auf mobilen Endgeräten und in einer Verkehrsrechnerzentrale umzusetzen. In der vorliegenden Arbeit werden die folgenden FTD-Verfahren hergeleitet:

3.2.1 FTD-Verfahren auf mobilen Endgeräten

Bei einer Nutzung des Lotsendienstes durch Verkehrsteilnehmer werden auf Mobiltelefonen Programme gestartet, die die Reisenden möglichst schnell und umfassend über die Verkehrssituation informieren sollen. Ziel dabei ist es, ein möglichst komfortables System zur Verfügung zu stellen, bei dem die Nutzer möglichst geringe Eingaben an Mobiltelefonen tätigen müssen. Daher soll das Mobiltelefon automatisch erkennen, mit welchem Verkehrsmittel der Reisende sich fortbewegt, um dadurch automatisch die für ihn relevanten Informationen zusammenzustellen. Je nach Verkehrsmittelwahl sind auf dem Mobiltelefon und in der Verkehrsrechnerzentrale unterschiedliche Verfahren zu aktivieren, um Staus im Straßenverkehr oder Verspätungen von Bussen und Bahnen zu berechnen. Daher ist die Erkennung der Verkehrsmittelwahl eine wichtige Komponente in der FTD-Verfahrensentwicklung.

Neben der möglichst einfachen Handhabung für die Nutzer sind auch technische Anforderungen bei der Verfahrensentwicklung zu berücksichtigen. Vor allem die Kosten zur Datenübertragung sind zu minimieren. Diese resultieren aus den zwischen Mobiltelefonen und der Verkehrsrechnerzentrale übertragenen Daten. Durch das Ortungsmodul des Mobiltelefons wird pro Sekunde ein Datensatz erzeugt, in dem die aktuelle Position (Längen- und Breitengrad, Bewegungsgeschwindigkeit, Bewegungsrichtung und Drehrate) berechnet wird. Es ist nicht erforderlich, die Daten der Mobiltelefone z.B. in 1-Sekunden-Intervallen an die Verkehrsrechnerzentrale zu senden. Dies würde zu hohen Übertragungskosten führen. Daher ist auf den Mobiltelefonen ein Verfahren anzuwenden, das die Positionsdaten sinnvoll reduziert und anschließend an die Verkehrsrechnerzentrale sendet.

Deshalb werden für Mobiltelefone folgende FTD-Verfahren entwickelt:

- Automatisierte Erkennung der Verkehrsmittelwahl aus typischen Bewegungsmustern von Autofahrern, ÖV-Nutzern, Radfahrern und Fußgängern.
- Datenreduktion der Bewegungsspuren zur Minimierung der Kommunikationskosten. Je nach Verkehrsmittelwahl sind unterschiedliche Verfahren anzuwenden.

3.2.2 FTD-Verfahren – Motorisierter Individualverkehr

Die von den Mobiltelefonen an die Verkehrsrechnerzentrale gesandten Bewegungsdaten müssen analysiert und aufbereitet werden. Je nach Verbreitungsgrad sind die eingehenden Daten zunächst auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen. Im MIV wird dazu ein Vergleich mit stationären Daten (Detektordaten an Lichtsignalanlagen) durchgeführt. Durch die Sensorfusion wird für die mobil erhobenen Daten ein Vertrauensattribut berechnet (FTD-Bewertungskennwert). Dieses hat wiederum Eingang in die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs. Zusammenfassend werden für den MIV die folgenden FTD-Verfahren entwickelt:

- Erfassung, Analyse und Aufbereitung mobil erhobener Daten.
- Erfassung, Analyse und Aufbereitung stationär erhobener Daten im innerstädtischen Straßennetz.
- Datenfusion stationär und mobil erhobener Daten zur Ermittlung von mittleren momentanen Fahrgeschwindigkeiten in innerstädtischen Streckenabschnitten.
- Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs.

3.2.3 FTD-Verfahren – Öffentlicher Verkehr

Auch im Öffentlichen Verkehr werden die eingehenden Bewegungsspuren der Mobiltelefone in der Verkehrsrechnerzentrale analysiert. Ziel der Auswertung ist es, Verspätungen von Bussen und Bahnen zu erkennen. In einem nächsten Schritt ist das Datenmodell des Soll-Fahrplans anzupassen, damit den Reisenden aufbauend auf den Ist-Daten eine Fahrplanauskunft zur Verfügung gestellt werden kann.

Zusammenfassend werden für den ÖV die folgenden FTD-Verfahren entwickelt:

- Erkennung von Fahrzeughalten an Haltestellen (MapMatching)
- Vergleich von Soll-Fahrplandaten mit Ist-Ankunftszeiten an Haltestellen durch mobil erhobene Daten.
- Anpassung des Soll-Fahrplans mit aktuellen Ist-Fahrplandaten.

3.2.4 FTD-Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr (Radfahrer, Fußgänger)

Ziel des FTD-Verfahrens für Fußgänger und Radfahrer ist es, Routinginformationen unter Berücksichtigung von Fußwegen bzw. Radwegen bereitzustellen. Von Datenbank Anbietern der Firma NAVTEQ und Teleatlas können nur Verkehrsnetze bezogen werden, in denen das Straßennetz aufgenommen wurde. Fußgänger und Radwege, die sich nicht unmittelbar an einer Straße befinden, werden bislang nur selten in den Datenmodellen hinterlegt. Daher wird ein FTD-Verfahren entwickelt, das die

- Identifikation neuer Datenbankelemente aus Bewegungsspuren für Fußgänger- und Radwege zur Bereitstellung innerhalb von Routing-Diensten ermöglicht.

Der Zusammenhang zwischen den einzelnen FTD-Verfahren ist in **Bild 3-1** dargestellt. Die in dieser Arbeit entwickelten und vertieft behandelten Verfahren sind darin rot umrandet.

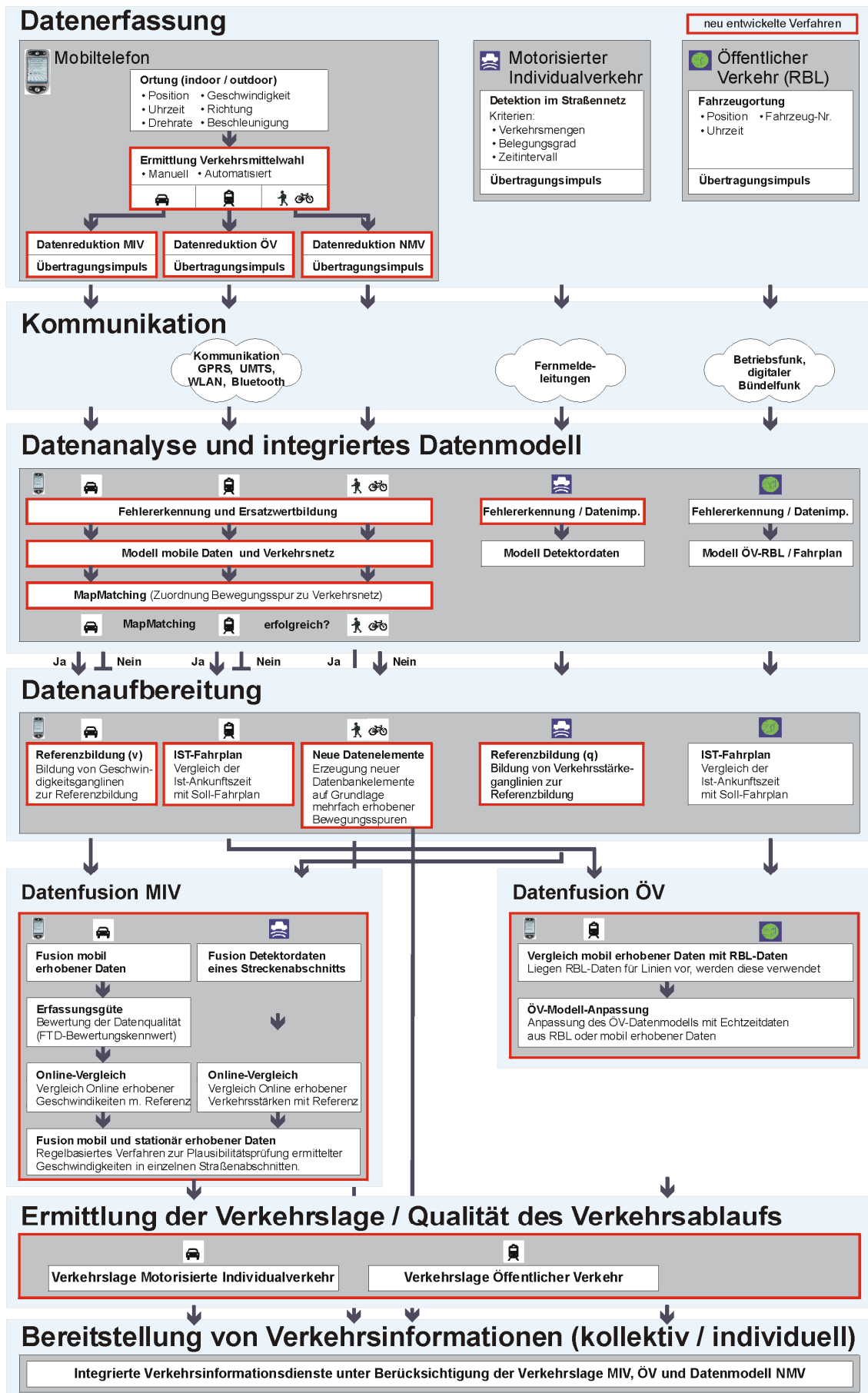


Bild 3-1: Verfahrensablauf „Floating Traveller Data (FTD)“

3.3 Untersuchungsraum

3.3.1 Einleitung

Eine wichtige Grundlage für den Betrieb eines intermodalen Verkehrsinformationsdienstes ist die Bereitstellung und die Aufbereitung aktueller Daten im Motorisierten Individualverkehr und im Öffentlichen Verkehr. Für die Entwicklung und Erprobung der FTD-Verfahren wurde eine Stadt mittlerer Größe in Südhessen gewählt, die über eine typische verkehrstechnische Infrastruktur verfügt. Darüber hinaus sollte für eine Konzeptionsphase und die Umsetzung eines Prototypen die Kooperationsbereitschaft der öffentlichen Aufgabenträger (sowohl Stadt als auch Öffentlicher Verkehr) gesichert sein. Mit der Stadt Darmstadt ließ sich ein geeignetes Testgebiet finden, in dem eine gute Detektion im Straßennetz mit Induktionsschleifen an Lichtsignalanlagen vorhanden ist. Diese Daten werden online an zentrale Rechner übermittelt. Der Betreiber des Öffentlichen Verkehrs in Darmstadt, die HEAG Verkehrs GmbH, verfügt über ein rechnergestütztes Betriebsleitsystem. Die Positionsbestimmung der Busse und Bahnen sowie mögliche Verspätungen und Störungen werden sofort an eine Zentrale übermittelt. Durch das RBL können nicht nur statische Fahrplandaten sondern auch Echtzeitdaten generiert und über dynamische Haltestellenanzeigen veröffentlicht werden. Nachfolgend wird der Untersuchungsraum mit dem relevanten Verkehrsnetz beschrieben.

3.3.2 Detektion Öffentlicher Verkehr

Die HEAG Verkehrs GmbH ist als Betreiber für den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) in Darmstadt zuständig. Im Stadtgebiet Darmstadt betreibt die HEAG sechs Straßenbahnlinien und 20 Buslinien die mit 44 Straßenbahnen und 81 Bussen betrieben werden. Insgesamt gibt es 223 Haltestellen im Stadtgebiet. Zur Erfassung des Betriebsablaufs der Busse und Straßenbahnen betreibt die HEAG ein Rechnergestütztes Betriebsleitsystem (RBL) vom Typ Vicos-Lio 100 der Firma Siemens.

Die Positionsbestimmung der Fahrzeuge erfolgt durch Methoden der logischen Ortung. Die Positionen und Uhrzeiten werden direkt per Funk an die Zentrale übermittelt. Zusätzlich sind im Stadtgebiet entlang der Linienverläufe Ortsbaken installiert, die ebenfalls zur Positionsbestimmung genutzt werden können. Störungen im Betriebsablauf werden aus den Verspätungen der Fahrzeuge abgeleitet.

An ausgewählten Haltestellen werden die Ist-Ankunftszeiten der Fahrzeuge den Verkehrsteilnehmern angezeigt. Das RBL besitzt bisher keine weitergehenden Schnittstellen, die es ermöglichen, die Echtzeitdaten für weiterführende Auskunftsdienste zu nutzen.

3.3.3 Detektion innerstädtischer Straßenverkehr

Die Stadt Darmstadt verfügt im Stadtgebiet über insgesamt 157 Lichtsignalanlagen (LSA). Davon werden 112 Anlagen an Knotenpunkten und 45 Anlagen zum Fußgängerschutz betrieben. Die Mehrzahl der LSA ist mit einer Mikroprozessorsteuerung ausgestattet, wodurch eine verkehrsabhängige Beeinflussung der Freigabezeiten ermöglicht wird. In den Zufahrten



Bild 3-2: Straßennetz in Darmstadt mit mechanisch und elektronisch geregelten LSA-Steuergeräten

befinden sich Detektoren (Induktionsschleifen). Die ca. 620 Detektoren im Straßennetz werden für die Messwerterfassung getrennt mit unterschiedlichen Zeitlücken, Freigabeabfolge- und Belegungszeiten erfasst. Folgende Eingangssignale werden erhoben:

- Belegung eines Detektors,
- Nichtbelegung eines Detektors,
- Belegungszeit und Zeitlücken.

In **Bild 3-2** ist das Straßennetz dargestellt, das mit Detektoren und Lichtsignalanlagen ausgestattet ist. Die Detektorwerte werden in Intervallen von 5, 15 und 60 Minuten, für 24 Stunden erfasst. Für eine spätere Fusion von Detektordaten mit Bewegungsdaten der mobilen Endgeräte ist die Kenntnis über die genaue Lage der Detektoren erforderlich, die in Lageplänen verzeichnet sind. Diese wurden von der Stadt Darmstadt zur Verfügung gestellt. Ein Betriebsführungsrechner erfasst alle Detektordaten in einer zentralen Datenbank.

3.4 FTD-Verfahren auf mobilen Endgeräten

3.4.1 Ortung innerhalb und außerhalb von Gebäuden

Ein wesentliches Charakteristikum des angestrebten FTD-Lösungsansatzes ist die ständige Verfügbarkeit von Positions- und Richtungsinformationen. Außerhalb von Gebäuden (outdoor-Ortung) kann bei freier Sicht auf den Himmel das Satellitennavigationssystem GPS, oder zukünftig Galileo, genutzt werden. Innerhalb von Gebäuden werden die Satellitensignale nicht mehr empfangen, so dass keine Ortung (indoor-Ortung) durch den GPS-Sensor möglich ist. Daher sind andere Verfahren einzusetzen, die eine Positionsbestimmung ermöglichen. Zudem ist bei der Ortung zu berücksichtigen, dass je nach Umgebungsverhältnissen die Genauigkeit und die Verfügbarkeit der Ortungsinformationen stark variieren kann. Während für die Fahrzeugnavigation schon heute mittels Geschwindigkeitsmesser, Kompass und digitaler Karten Ortungsfehler minimiert werden, werden im mobilen Einsatz bei Personen diese Anforderungen aufgrund fehlender Technik bei weitem nicht erfüllt.

Innerhalb des Projektes COX [MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002] wurden technische Lösungen aufgezeigt, verschiedene Sensoren von Mobiltelefonen zur Positionsbestimmung miteinander zu fusionieren. Durch diese Verfahren werden Ungenauigkeiten eines Sensors (z.B. Geschwindigkeitsermittlung bei GPS) durch einen anderen Sensor ausgeglichen. Die einzelnen Sensoren, die zur Ortung mobiler Endgeräte herangezogen werden können, sind in folgende Klassen einzuteilen. Es ist festzuhalten, dass aus dem Sensorspektrum zahlreiche Kombinationen für eine Sensorfusion denkbar sind.

- Satellitennavigation (GPS / Galileo): Die Module sind kostengünstig und im Outdoor-Bereich mit freier Sicht zum Himmel sehr leistungsstark. In Innenstädten kann es jedoch zu unvorhersehbaren Störungen durch Reflektionen und Mehrwegeausbreitungen kommen. Für die Einsatzgebiete mobiler Lotsendienste innerhalb und außerhalb von Gebäuden ist dieser Sensor nicht ausreichend, stellt aber eine wichtige Komponente für das Ortungsmodul dar. Der Vorteil der Satellitennavigation liegt in der direkten Berechnung der absoluten Position.
- Mobilfunkortung (GSM/GPRS/UMTS): Durch die gute Abdeckung der meisten Verkehrsräume bietet es sich an, diese Kommunikationstechnologie auch zur Ortung zu nutzen. Der Vorteil dieser Technologie ist die hohe Verfügbarkeit auch im Indoor-Bereich, jedoch ist die erreichbare Positionsgenauigkeit deutlich schlechter als bei GPS. GSM hat den Vorteil, dass es als Kommunikationskanal fester Bestandteil von jedem Mobiltelefon ist.
- Lokale Infrastruktur: Es werden Systeme wie WLAN, Bluetooth und Baken zusammengefasst, da sich diese Systeme ähnlich der Mobilfunk-Infrastruktur verhalten, aber eine geringere Reichweite haben. Dies führt zu einer bisher nur sporadischen Abdeckung in bestimmten dicht besiedelten Gebieten, bietet aber eine gute Erweiterung zur Indoor-Ortung.
- Koppelnavigation: Unter dieser Kategorie werden die Sensoren zur relativen Positionsermittlung zusammengefasst. Die Entfernung kann mit einem Schrittzähler oder

einem Doppler-Radar, die Richtung mit einem Kreisel oder einem Kompassmodul und die Höhe mit einem Barometer gemessen werden. Je nach Anwendungsbereich (2D, 3D, etc.) sind hierbei vielfältige Kombinationen denkbar. Generell wird jedoch mindestens ein Sensor für die Geschwindigkeit und ein Sensor für die Richtung benötigt. Der Vorteil dieser Technologie ist die Unabhängigkeit von äußeren Bedingungen und dass sie überall verfügbar ist. Jedoch akkumulieren sich Fehler über Zeit und Weg, wenn keine Positionsstützung (z.B. GPS-Signal) verfügbar ist. Weiterhin sind diese Sensoren abhängig von der Handhabung eines mobilen Endgeräts durch den Anwender.

Bei der Entwicklung einer neuen Ortungskomponente sind unterschiedliche Anforderungen zu berücksichtigen. Wichtige Kenngrößen zur Bewertung sind die Genauigkeit und Verfügbarkeit von Ortungssignalen. Die Leistungsfähigkeit des Ortungsmoduls hängt von den Einflüssen Sensorauswahl, Umgebungsbedingungen, Handhabung und Mobilitätsverhalten ab. Es werden folgende Umgebungsbedingungen unterschieden:

- Outdoor: Mit freier Sicht zum Himmel und mit eingeschränkter Sicht zum Himmel z. B. durch Gelände, Bebauung und Bepflanzung.
- Indoor: Im Hochbau mit möglichem Sichtkontakt durch Fenster zu Satellitensignalen und im Tiefbau, was den Empfang von Satellitensignalen völlig ausschließt.
- InVehicle: Gerade für die Nutzung eines verkehrsmittelunabhängigen Mobilitätsdienstes ist diese Kategorie von besonderer Bedeutung. Dabei ist zu unterscheiden, ob es sich um Öffentlichen- oder Individualverkehr handelt.

Es wurden verschiedene Ortungssensoren hinsichtlich ihrer Eignung für mobile Lotsendienste überprüft. Die Untersuchungen haben ergeben, dass Verwendung der folgenden Sensoren sinnvoll erscheint, um die Genauigkeit und Verfügbarkeit von Positionsdaten optimal zu bestimmen: GSM, Bluetooth, Infrarot, WLAN, GPS, 3D-Beschleunigungsmesser, Kompass, Doppler-Radar, Barometer. Eine Überprüfung der Anwendbarkeit und eine qualitative Bewertung der Sensoren ist in **Kapitel 9.8** beigefügt.

Innerhalb des Projektes COX (vgl. **[MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002]**) wurde neben den hier beschriebenen FTD-Verfahren auch ein Modul zur verbesserten Ortung von Mobiltelefonen entwickelt, in dem unterschiedliche Sensoren miteinander verbunden wurden. Das entwickelte Verfahren ermöglicht eine genaue Positionsbestimmung innerhalb und außerhalb von Gebäuden. Bei der Umsetzung der FTD-Verfahren wurden in einer ersten Phase Endgeräte mit handtypischen Sensoren verwendet. Hierzu gehören GPS, GSM, WLAN und Bluetooth. Die Informationen der Sensoren werden in einem Softwaremodul auf dem mobilen Endgerät ausgewertet, fehlerbereinigt und fusioniert. Die Positionsdaten werden anschließend für die weiteren FTD-Verfahren zur Verfügung gestellt.

3.4.2 Ermittlung der Verkehrsmittelwahl

Grundlagen

Im mobilen Endgerät ist bereits sehr frühzeitig eine Analyse der vom Ortungsmodul erfassten Bewegungsspuren vorzunehmen, damit eine Erkennung des aktuell genutzten Verkehrsmittels möglich wird. Es wird eine Klassifizierung der Bewegungsspuren vorgenommen in

- Fußgänger,
- Radverkehr,
- Motorisierter Individualverkehr und
- Öffentlichen Verkehr.

Die Identifikation von Bewegungsmustern und deren Zuordnung zum verwendeten Verkehrsmittel ist komplex. Die Schwierigkeit besteht in der Analyse und Differenzierung von Bewegungsgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und Drehraten in einem Zeitintervall, von unterschiedlichen Bewegungsspuren, deren Kennwerte, obwohl in unterschiedlichen Verkehrsmitteln aufgezeichnet, sich stark ähneln können. Ein Beispiel unterschiedlicher Bewegungsspuren wurde bereits Kapitel 1 (**Bild 1-4**, Seite 7) gezeigt.

Ziel ist es ein geeignetes Verfahren zu entwickeln, das die Ableitung der Verkehrsmittelwahl aus den Bewegungsspuren ermöglicht.

Verfahren

Die bislang verwendeten Ortungssensoren liefern ausschließlich Positions-, Geschwindigkeits-, Track- und Statusdaten. Langsame Radfahrer können dabei nicht von schnell gehenden Fußgängern unterschieden werden. Desgleichen sind Fahrzeuge bei langsamer Fahrweise, beispielsweise in stockendem Verkehr, ggf. nicht von Radfahrern zu unterscheiden. Das derzeitige Ortungsmodul des Endgerätes kann mit weiteren Sensoren wie Drehraten- und Beschleunigungsmessern ergänzt werden (vgl. **Kapitel 3.4.1**). Mit Hilfe dieser erweiterten Einheit lassen sich typische Bewegungsmuster wie Schrittfolgen sowie fußgänger- bzw. radfahrertypische Dreh- und Wendemanöver identifizieren. Für eine weitergehende Ermittlung der Verkehrsmittelwahl werden die Kennwerte

- Geschwindigkeit [m/s],
- Beschleunigung [m/s^2] und
- Drehrate [%/s]

näher analysiert. Die Parameter errechnen sich zu:

Geschwindigkeit:

$$v_i = \frac{\Delta x_i}{t_i - t_{i-1}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:	v_i	= Geschwindigkeit im Übertragungsintervall i	[m/s]
	Δx_i	= zurückgelegte Strecke im Übertragungsintervall i	[m]
	t_i	= Zeitpunkt der Übertragung des Übertragungsintervall i	[s]
	t_{i-1}	= Zeitpunkt der Übertragung des Übertragungsintervall i-1	[s]

Beschleunigungen:

$$b_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:	b_i	= Beschleunigung im Übertragungsintervall i	[m/s ²]
	v_i	= Geschwindigkeit im Übertragungsintervall i	[m/s]
	v_{i-1}	= Geschwindigkeit im Übertragungsintervall i-1	[m/s]
	t_i	= Zeitpunkt der Übertragung des Übertragungsintervall i	[s]
	t_{i-1}	= Zeitpunkt der Übertragung des Übertragungsintervall i-1	[s]

Drehraten:

$$\omega_i = \frac{\rho_i - \rho_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \left[\frac{^\circ}{s} \right] \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit:	ω_i	= Drehrate im Übertragungsintervall i	[Grad/s]
	ρ_i	= Bewegungswinkel im Übertragungsintervall i	[Grad]
	ρ_{i-1}	= Bewegungswinkel im Übertragungsintervall i-1	[Grad]
	t_i	= Zeitpunkt der Übertragung des Übertragungsintervall i	[s]
	t_{i-1}	= Zeitpunkt der Übertragung des Übertragungsintervall i-1	[s]

Wichtig: Der Übergang von 0° zu 360° ist bei einer Umsetzung zu berücksichtigen.

In der Regel werden die Positionsdaten in Abständen von einer Sekunde erfasst, so dass Geschwindigkeit, Beschleunigung und Drehrate ebenfalls in 1-Sekunden-Intervallen berechnet werden.

Zur automatisierten Erkennung der Verkehrsmittelwahl müssen zunächst Bewegungsprofile detailliert untersucht und hinsichtlich der oben beschriebenen Parameter analysiert werden.

Diese Arbeiten bilden die Grundlage der Wissensgenerierung, damit später in einem automatisierten Prozess die Erkennung der Verkehrsmittelwahl ermöglicht wird. Das Data Mining stellt ergänzend zur Statistik Analysemethoden zur Verfügung, die insbesondere dann von Interesse sind, wenn die Zusammenhänge in den Daten und des darauf aufbauende Modells nur unzureichend bekannt sind [BECKER, 2005].

Eine Methode des Data Mining sind Fuzzy Technologien. Diese stellt eine Verallgemeinerung der klassischen Mengenlehre und der zweiwertigen, d.h. dualen Logik dar. In der Theorie der unscharfen Mengen gibt es neben der zweiwertigen Mengenzugehörigkeit (ja/nein bzw. 1/0) auch die graduelle Zugehörigkeit. Bei der Fuzzy Regelbasis ist bereits Wissen über das Verhalten des Prozesses vorhanden. In Wenn-Dann-Regeln wird dieses Wissen abgelegt. Somit werden die Abhängigkeiten von Experten formuliert. Die Fuzzy Regelbasis kann zur Klassifikation, zur Modellbildung und zur Regelung genutzt werden.

Zum Aufbau einer Regelbasis für die Erkennung der Verkehrsmittelwahl wurden Messungen mit GPS-Empfängern durchgeführt, mit denen Bewegungsspuren bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln aufgezeichnet wurden. In einem nächsten Schritt wurden die Bewegungsspuren analysiert. Dazu wurde ein Programm entwickelt, mit dessen Hilfe einerseits gemessene Minimal- und Maximalwerte der Drehraten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln ermittelt werden konnte. Andererseits wurde eine Regelbasis zur Erkennung der Verkehrsmittelwahl abgelegt, und mit verschiedenen Bewegungsspuren getestet.

Aus den durchgeführten Messungen wurden die folgenden Minimal- und Maximalwerte der untersuchten Kriterien ermittelt:

	Analysierte Datensätze	Drehrate		Geschwindigkeit		Beschleunigung	
		[Grad/s]		[km/h]		[m/s ²]	
	[-]	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Straßenbahn	944	-37	37	0	51	-2,7	2,5
Pkw	1689	-83	83	0	115	-4,5	3,0
Fahrrad	757	-117	117	0	30	-3,5	2,2
Fußgänger	968	-168	168	0	7	-1,5	1,3

Tabelle 3-1: Minimal- und Maximalwerte der Drehraten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln⁵

Die in **Tabelle 3-1** dargestellten Minimal- und Maximalwerte der Drehraten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln hängen natürlich stark vom individuellen Verhalten des jeweiligen Verkehrsteilnehmers ab. Zur Herleitung einer möglichen Vorgehensweise zur Erkennung der Verkehrsmittelwahl wurden diese Kennwerte dennoch für die Definition von „Fuzzy Regeln“ herangezogen. Folgende Regeln werden bei der automatisierten Auswertung der Bewegungsspuren definiert, um die Verkehrsmittelwahl zu identifizieren:

⁵ Im öffentlichen Verkehr wurden ausschließlich Fahrten mit Straßenbahnen durchgeführt. Bei einer Detaillierung des Verfahrens sind weiter Testfahrten z.B. mit Bussen und Bahnen durchzuführen.

1. Wenn die Drehrate zwischen -37 und 37 Grad/s und Geschwindigkeit < 51 km/h und Beschleunigung zwischen -2,7 und 2,5 m/s² dann Verkehrsmittel = Straßenbahn
2. Wenn die Drehrate zwischen -83 und 83 Grad/s und Geschwindigkeit < 250 km/h und Beschleunigung zwischen -4,5 und 2,9 m/s² dann Verkehrsmittel = Pkw
3. Wenn die Drehrate zwischen -117 und 117 Grad/s und Geschwindigkeit < 30 km/h und Beschleunigung zwischen -3,5 und 2,2 m/s² dann Verkehrsmittel = Fahrrad
4. Wenn die Drehrate zwischen -168 und 168 Grad/s und Geschwindigkeit < 7 km/h und Beschleunigung zwischen -1,5 und 1,3 m/s² dann Verkehrsmittel = Fußgänger

Bei einer näheren Betrachtung der Regeln fällt auf, dass nicht überall klare Übergänge zwischen den Verkehrsmitteln erkennbar sind. Vor allem bei geringen Geschwindigkeiten, Drehraten und Beschleunigungen ist eine Unterscheidung der Verkehrsmittelwahl nicht möglich. Für die Auswertung der Daten dürfen daher keine Einzelwerte herangezogen werden. Vielmehr sind über einen zu definierenden Zeitraum die Bewegungsspuren mit ihren Kennwerten zu analysieren und die oben aufgestellten Regeln auszuwerten.

Mit dem zur Analyse der Bewegungsspuren entwickelten Programm wurde untersucht, über welchen Zeitraum Beobachtungen der Kennwerte durchzuführen sind, um zu einer eindeutigen Identifikation der Verkehrsmittelwahl zu gelangen. Zunächst wurde daher festgelegt, nach wie viel Sekunden eine Identifikation der Verkehrsmittelwahl erzielt werden sollte. Gewählt wurden Zeiträume mit einer Länge von 60, 120, 180, 240, ... Sekunden bis zur maximalen Aufzeichnungslänge der jeweiligen Bewegungsspur. In einem nächsten Schritt wurde jeder einzelne Bewegungspunkt durch die oben definierten Fuzzy-Regeln überprüft. Als Ergebnis der Überprüfung wurde die mögliche Wahl des Verkehrsmittels ausgegeben. Folgende Erkenntnisse konnten aus dieser Betrachtung gezogen werden:

- Vor allem bei geringen Geschwindigkeiten, Drehraten und Beschleunigungen kommen alle Verkehrsmittel zur Nutzung in Frage. Eine Unterscheidung der Verkehrsmittelwahl ist nicht möglich.
- Es sind längere Beobachtungszeiträume zu betrachten, aber
- die Identifikation der Verkehrsmittelwahl ist je nach Beobachtungsdauer (z.B. 60 Sekunden) der Bewegungsspur unterschiedlich.
- Der Ausschluss einer Verkehrsmittelwahl sollte immer aus mehreren Bewegungspunkten innerhalb der Beobachtungsdauer resultieren.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse wurde ein Verfahren getestet, bei dem ein Beobachtungszeitraum (z.B. 120 Sekunden) in gleich lange Teilintervalle (z.B. 20 Sekunden) zerlegt wird. Für jedes der Teilintervalle wird dann geprüft, welche Verkehrsmittel derzeit aus der Berücksichtigung der Fuzzy-Regeln erkannt werden. **Bild 3-3** zeigt die Analyse einer aufgezeichneten Bewegungsspur eines Pkw. Diese wurden durch das Programm eingelesen. In einem nächsten Schritt wurde die Beobachtungsdauer (hier: 240 Sekunden) und die Länge der untersuchten Teilintervalle (hier: 20 Sekunden) gewählt. In einem iterativen Prozess wurde für jedes Teilintervall die Fuzzy-Regeln geprüft und nach Abschluss der gesamten Beobachtungsdauer die Häufigkeit der erkannten Verkehrsmittelwahl summiert. In

Bild 3-3 ist das Ergebnis der Berechnungen an einem Beispiel dargestellt. Im oberen Teil des Programms wird das Gesamtergebnis der Bewegungsspuranalyse zusammengefasst. Neben den maximalen und minimalen Kennwerten der Drehrate, Beschleunigung und Geschwindigkeit wird die Häufigkeit der Intervalle aufgelistet, in denen die jeweilige Verkehrsmittelwahl erkannt wurde. In 10 von 12 Intervallen (83%) wurde festgestellt, dass die Bewegungsspur von einem Straßenbahnnutzer stammen könnte. In allen Intervallen wurde festgestellt, dass es sich möglicherweise um einen Pkw-Fahrer handelt. In jeweils 8 von 12 Teilintervallen (67%) wurde ein Radfahrer oder Fußgänger identifiziert. Tatsächlich handelt es sich um eine Bewegungsspur eines Pkw-Fahrers.

Die Häufigkeitsbetrachtung für das Erkennen der Verkehrsmittelwahl in den einzelnen Zeitintervallen ermöglicht eine bessere Einschätzung der Genauigkeit des Gesamtergebnisses. In dem Beispiel wurde der Pkw als gewähltes Verkehrsmittel identifiziert, da in 100% der Zeitintervalle die Kennwerte innerhalb der Fuzzy-Regeln lagen. Gleichzeitig wurde keine Identifikation der übrigen Verkehrsmittel in den Zeitintervallen festgestellt.

Gesamtergebnis:

xxxx Ende der Berechnung xxxxx

- Betrachtete Bewegungsspur: pkw.txt
- Analyisierte Bewegungspunkte: 1684
- Max_Drehrate: 81,1 [Grad/s]
- Min_Drehrate: 0 [Grad/s]
- Max_Geschwindigkeit: 114,4 [km/h]
- Min_Geschwindigkeit: 0 [km/h]
- Max_Beschleunigung: 2,9 [m/s²]
- Min_Beschleunigung: -4,3 [m/s²]
- Länge der untersuchten Bewegungsspur: 240 s
- Länge der Teilintervalle: 20 s
- Anzahl der Intervalle: 12
- Häufigkeit der Intervalle mit Straßenbahnnutzung: 10 (83,3 %)
- Häufigkeit der Intervalle mit Pkw-Nutzung: 12 (100 %)
- Häufigkeit der Intervalle mit Rad-Nutzung: 8 (66,7 %)
- Häufigkeit der Intervalle als Fußgänger: 8 (66,7 %)

Erkennung der Verkehrsmittel:

- ☒ Straßenbahn
- ☒ Pkw
- ☒ Fahrrad
- ☒ Fußgänger

Ergebnis für Teilintervalle:

- * Tram_Ident(181) = Wahr
- * pkw_Ident(181) = Wahr
- * Rad_Ident(167) = Falsch
- * Fuss_Ident(162) = Falsch
- * Tram_Ident(201) = Wahr
- * pkw_Ident(201) = Wahr
- * Rad_Ident(181) = Falsch
- * Fuss_Ident(181) = Falsch
- * Tram_Ident(216) = Falsch
- * pkw_Ident(221) = Wahr
- * Rad_Ident(210) = Falsch
- * Fuss_Ident(210) = Falsch

Bild 3-3: Programm zur Erkennung der Verkehrsmittelwahl aus der Analyse von Bewegungsspuren; Beispielrechnung mit einer Pkw-Bewegungsspur.

Das zuvor beschriebene Verfahren wurde für alle aufgezeichneten Bewegungsspuren angewandt. Dabei sollte ermittelt werden, wie lang die Beobachtungsdauer sein sollte, um auf eine eindeutige Erkennung der Verkehrsmittelwahl zu schließen. Die nachfolgenden Tabellen fassen die Ergebnisse zusammen:

Analysierte Bewegungsspur: Pkw

Analysierte Bewegungsspur: Pkw	Einheit	1.Test	2.Test	3.Test	4.Test	5.Test	6.Test	7.Test
Analysierte Bewegungspunkte	[-]	1684	1684	1684	1684	1684	1684	1684
Länge der Bewegungsspur	[s]	60	120	180	240	360	600	1684
Länge der Teilintervalle	[s]	20	20	20	20	20	20	20
Anzahl untersuchter Teilintervalle	[-]	3	6	9	12	18	30	85
Häufigkeit der Intervalle mit Straßenbahnnutzung	[-]	2 (66,7%)	5 (83,3%)	8 (88,9%)	10 (83,3%)	15 (83,3%)	26 (86,7%)	53 (62,4%)
Häufigkeit der Intervalle mit Pkw-Nutzung	[-]	3 (100%)	6 (100%)	9 (100%)	12 (100%)	18 (100%)	30 (100%)	85 (100%)
Häufigkeit der Intervalle mit Rad-Nutzung	[-]	3 (100%)	6 (100%)	8 (88,9%)	8 (66,7%)	10 (55,6%)	13 (43,3%)	25 (29,4%)
Häufigkeit der Intervalle als Fußgänger	[-]	3 (100%)	6 (100%)	8 (88,9%)	8 (66,7%)	9 (50%)	12 (40%)	22 (25,9%)

Tabelle 3-2: Ergebnis der Analyse einer Pkw-Bewegungsspur

Tabelle 3-2 zeigt, dass nach 180 Sekunden eine eindeutige Erkennung der des Verkehrsmittels Pkw möglich wird. Allerdings werden in 8 von 9 Zeitintervallen auch alle übrigen Verkehrsmittel als möglich erkannt. Erst nach 240 Sekunden entstehen größere Unterschiede in der Erkennung der Verkehrsmittelwahl.

Analysierte Bewegungsspur: Straßenbahn

Analysierte Bewegungsspur: Straßenbahn	Einheit	1.Test	2.Test	3.Test	4.Test	5.Test	6.Test	7.Test
Analysierte Bewegungspunkte	[-]	939	939	939	939	939	939	939
Länge der Bewegungsspur	[s]	60	120	240	360	480	600	939
Länge der Teilintervalle	[s]	20	20	20	20	20	20	20
Anzahl untersuchter Teilintervalle	[-]	3	6	12	18	24	30	47
Häufigkeit der Intervalle mit Straßenbahnnutzung	[-]	3 (100%)	6 (100%)	12 (100%)	18 (100%)	24 (100%)	30 (100%)	47 (100%)
Häufigkeit der Intervalle mit Pkw-Nutzung	[-]	3 (100%)	6 (100%)	12 (100%)	18 (100%)	24 (100%)	30 (100%)	47 (100%)
Häufigkeit der Intervalle mit Rad-Nutzung	[-]	3 (100%)	4 (66,7%)	7 (58,3%)	12 (66,7%)	18 (75%)	21 (70%)	28 (59,6%)
Häufigkeit der Intervalle als Fußgänger	[-]	0 (0%)	0 (0%)	1 (8,3%)	2 (11,1%)	3 (12,5%)	3 (10%)	5 (10,6%)

Tabelle 3-3: Ergebnis der Analyse einer Straßenbahn-Bewegungsspur

Tabelle 3-3 zeigt, dass während des gesamten Zeitraums keine eindeutige Erkennung der Verkehrsmittelwahl möglich ist, da Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Drehraten innerhalb der Gültigkeitsregeln für Pkw und für Straßenbahnen liegen. Die Nutzung eines Fahrrades oder die Zuordnung als Fußgänger kann allerdings bereits nach 120 Sekunden ausgeschlossen werden.

Analysierte Bewegungsspur: Fahrrad

Analysierte Bewegungsspur: Fahrrad	Einheit	1.Test	2.Test	3.Test	4.Test	5.Test	6.Test	7.Test
Analysierte Bewegungspunkte	[-]	753	753	753	753	753	753	753
Länge der Bewegungsspur	[s]	60	120	240	360	480	600	753
Länge der Teilintervalle	[s]	20	20	20	20	20	20	20
Anzahl untersuchter Teilintervalle	[-]	3	6	12	18	24	30	38
Häufigkeit der Intervalle mit Straßenbahnnutzung	[-]	2 (66,7%)	3 (50%)	9 (75%)	14 (77,8%)	18 (75%)	24 (80%)	32 (84,2%)
Häufigkeit der Intervalle mit Pkw-Nutzung	[-]	3 (100%)	4 (66,7%)	10 (83,3%)	16 (88,9%)	21 (87,5%)	27 (90%)	35 (92,1%)
Häufigkeit der Intervalle mit Rad-Nutzung	[-]	3 (100%)	6 (100%)	12 (100%)	18 (100%)	24 (100%)	30 (100%)	38 (100%)
Häufigkeit der Intervalle als Fußgänger	[-]	0 (0%)	1 (16,7%)	3 (25%)	3 (16,7%)	5 (20,8%)	5 (16,7%)	5 (13,2%)

Tabelle 3-4: Ergebnis der Analyse einer Fahrrad-Bewegungsspur

Bereits nach 120 Sekunden wurde das Fahrrad als gewähltes Verkehrsmittel erkannt.

Analysierte Bewegungsspur: Fußgänger

Analysierte Bewegungsspur: Fußgänger	Einheit	1.Test	2.Test	3.Test	4.Test	5.Test	6.Test	7.Test
Analysierte Bewegungspunkte	[-]	965	965	965	965	965	965	965
Länge der Bewegungsspur	[s]	60	120	240	360	480	600	965
Länge der Teilintervalle	[s]	20	20	20	20	20	20	20
Anzahl untersuchter Teilintervalle	[-]	3	6	12	18	24	30	49
Häufigkeit der Intervalle mit Straßenbahnnutzung	[-]	3 (100%)	6 (100%)	11 (91,7%)	15 (83,3%)	21 (87,5%)	26 (86,7%)	35 (71,4%)
Häufigkeit der Intervalle mit Pkw-Nutzung	[-]	3 (100%)	6 (100%)	12 (100%)	17 (94,4%)	23 (95,8%)	29 (96,7%)	46 (93,9%)
Häufigkeit der Intervalle mit Rad-Nutzung	[-]	3 (100%)	6 (100%)	12 (100%)	18 (100%)	24 (100%)	30 (100%)	47 (95,9%)
Häufigkeit der Intervalle als Fußgänger	[-]	3 (100%)	6 (100%)	12 (100%)	18 (100%)	24 (100%)	30 (100%)	49 (100%)

Tabelle 3-5: Ergebnis der Analyse einer Fußgänger-Bewegungsspur

Die Fußgängerbewegungsspur wurde erst über einen sehr langen Betrachtungszeitraum von größer 10 Minuten erkannt. Vor allem war eine Unterscheidung zum Fahrrad schwer möglich.

Alternativ: Manuelle Eingabe der Verkehrsmittelwahl

Da das zuvor beschriebene Verfahren derzeit keine eindeutige Identifizierung der Verkehrsmittelwahl ermöglicht, wird alternativ die manuelle Eingabe der Verkehrsmittelwahl vorgesehen. Es erfolgt eine Einteilung in Fußgänger, Radfahrer, Autofahrer und den Öffentlichen Verkehr. Dies ist sinnvoll, um eventuelle Fehlzuordnungen während der Erprobungsphase korrigieren zu können. Bei einer Ankopplung an ein Fahrzeugnavigationssystem können weitere Statusinformation übermittelt werden, aus denen das gewählte Verkehrsmittel hervorgeht. Ebenso ist im ÖPNV die Übermittlung einer entsprechenden Statusinformation z.B. über Bluetooth denkbar. Damit entfielen die automatisierte Erkennung der Verkehrsmittelwahl durch eine ausschließliche Analyse der Bewegungsspur im mobilen Endgerät.

Analyse des Verfahrensansatzes

Das zuvor beschriebene automatisierte Verfahren zu Erkennung der Verkehrsmittelwahl durch eine Definition von Entscheidungsgrenzen der Geschwindigkeit, Drehrate und Beschleunigung liefert erste Lösungsmöglichkeiten, die auf Mobiltelefonen umgesetzt werden könnten. Am besten wurden eine Fahrrad-Bewegungsspur und eine Pkw-Bewegungsspur nach einem Beobachtungszeitraum von 2 bzw. 3 Minuten erkannt. Straßenbahnen und Fußgänger wurden nicht eindeutig erkannt. Die Überprüfung der Maximal- und Minimalwerte der Bewegungskennwerte allein ist nicht ausreichend zur Erkennung der Verkehrsmittelwahl. Sie hängen auch stark vom individuellen Verhalten der Verkehrsteilnehmer ab. Daher ist das Verfahren derzeit noch nicht für eine Umsetzung geeignet.

Nachfolgend werden einige Aspekte genannt, die zu einer erfolgreichen Weiterentwicklung des Verfahrens beitragen können:

- Neben den Maximal- und Minimalwerten der Bewegungskennwerte sollte auch die Intensität von Änderungen in einem Zeitintervall in eine Analyse der Bewegungsspuren mit einfließen (z.B. Übergang von negativer auf positive Beschleunigung oder Drehrate). So ist denkbar, dass eine Straßenbahn eine gleichförmigere Bewegung vollzieht als ein Pkw-Fahrer, Fußgänger oder Radfahrer. Durch weitere detaillierte Analysen auf einem größeren Testdatenbestand können neue Erkenntnisse gewonnen werden.
- Bei der Schrifterkennung auf PDA's gibt es bereits einen „Lernmodus“, der das typische Schreibmuster der Nutzer analysiert. Ein ähnlicher Ansatz könnte auch auf Mobiltelefonen zur Analyse der Bewegungsspuren eingesetzt werden. Der Nutzer stellt die Verkehrsmittelwahl am Endgerät ein. Die entsprechenden Kennwerte der Bewegungsspur werden zur Wissensgenerierung gespeichert.
- Eine weitere Möglichkeit der Verfahrenverbesserung ist das MapMatching. Dazu ist Kartenmaterial der jeweiligen Verkehrsnetze im Mobiltelefon zu hinterlegen und eine Zuordnung der Bewegungsspuren durchzuführen. Dadurch können Fehlerkennungen der Verkehrsmittelwahl reduziert werden. Auf Grund der Kosten für Kartenlizenzen ist dieser Ansatz sekundär zu verfolgen.

3.4.3 Datenreduktion und Übertragungsimpuls

Grundlagen

Das Systemkonzept sieht vor, dass die mit mobilen Endgeräten generierten „Floating Traveller Data (FTD)“ in der Zentrale hinsichtlich der Reisezeiten ausgewertet werden. Ein häufig genannter Kritikpunkt bei bisherigen Floating-Car-Data-Verfahren sind die hohen Kommunikationskosten zwischen dem mobilen Endgerät und einer Verkehrsrechnerzentrale. Daher ist das Ziel, das Datenaufkommen zwischen Endgerät und Zentrale zu minimieren. Es wurde ein Verfahren entwickelt, das die in 1 Sekunden-Intervallen aufgezeichneten Positionspunkte soweit reduziert, dass sie weiterhin zentralenseitig für die Ableitung der Verkehrslage im Motorisierten Individualverkehr und im Öffentlichen Verkehr genutzt werden können.

Verfahren Motorisierter und Nichtmotorisierter Individualverkehr

Die „Ausdünnung“ von Bewegungsspuren im Motorisierten Individualverkehr, für Fußgänger und Radfahrer kann mit identischen Verfahren durchgeführt werden. Voraussetzung ist, dass der geometrische Verlauf der zurückgelegten Strecke erhalten bleibt. Im Motorisierten Individualverkehr müssen zusätzlich signifikante Geschwindigkeitsänderungen erkannt werden, damit zentralenseitig die korrekte Geschwindigkeit auf einzelnen Streckenabschnitten berechnet werden kann. Dazu wird die zentralenseitig eingehende Bewegungsspur durch ein so genanntes MapMatching-Verfahren einem Streckenelement der hinterlegten Streckendatenbank zugeordnet. Das Verfahren zur Reduktion der Bewegungsspur besteht in erster Linie aus der Erkennung einer Kurvenfahrt bzw. eines eingeleiteten Richtungswechsels. Dazu werden die in 1-Sekunden-Zeitintervallen gespeicherten Positionsdaten in

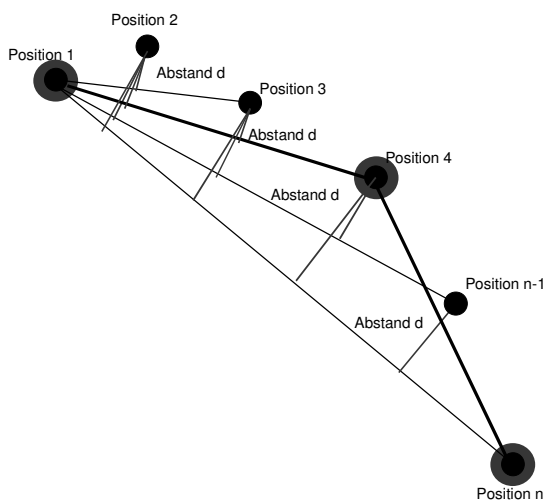


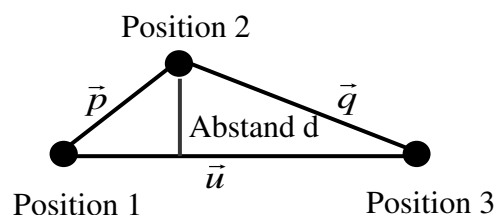
Bild 3-4: Reduktion einer Bewegungsspur durch Ausdünnung von Positionspunkten bei einem Unterschreiten einer zulässigen Distanzschwelle

einen geometrischen Zusammenhang gestellt. Wird eine vorgegebene Distanzschwelle der Orthogonalen eines Positionspunktes zu einer Verbindungslinie zwischen zwei weiteren Positionspunkten unterschritten, so kann dieser Positionspunkt aus der Gesamtbewegungsspur gelöscht werden. Erst bei einem Überschreiten der Distanzschwelle ist eine signifikante Veränderung der Bewegungsrichtung festzustellen. Der zugehörige Positionspunkt darf für eine geometrische Abbildung der Bewegungsspur nicht gelöscht werden. Ein Beispiel zeigt **Bild 3-4**. Die Länge der Orthogonalen der Positionen 2 und 3 auf die Verbindungslinie zwischen Position 1 und 4 ist kleiner als die Distanzschwelle. Daher können diese Positionspunkte entfallen. Position 1, 4 und n dürfen allerdings nicht gelöscht werden,

da sie für die Abbildung der Bewegungsgeometrie erhalten bleiben müssen. Die Abbildung des geometrischen Anteils der Datenreduktion ist wie folgt definiert:

Der Abstand d eines Punktes zur Geraden errechnet sich zu

$$d = \frac{|(\vec{q} - \vec{p}) \times \vec{u}|}{|\vec{u}|}$$



Folgende Berechnungsschritte sind durchzuführen:

Umrechnung von Längen- und Breitengrad in X- und Y-Koordinaten [Metern]:

Das Global Positioning System (GPS) und das im Projekt COX entwickelte Ortungsmodul liefert Koordinaten in „World Geodetic System“ von 1984 (WGS84), welches ein internationales Referenzsystem zur Positionsbestimmung darstellt. Das WGS84 ist das mit den GPS-Daten verbundene geozentrische globale kartesische Koordinatensystem. Es entspricht im Rahmen seiner Genauigkeit von etwa 0.1 m dem Internationalen Terrestrischen Referenzsystem ITRF. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im mittleren Massezentrum der Erde. Die positive x-Achse wird über den mittleren Meridian von Greenwich definiert. Die positive z-Richtung stimmt mit der mittleren Erdrotationsachse überein. Die x,y-Ebene wird über die Äquatorebene definiert. Zur Darstellung der kartesischen Koordinaten in Form von geographischen Koordinaten in Breite, Länge und Höhe wird das geozentrische GRS80 Ellipsoid mit den Ellipsoidhalbachsen $a = 6378137.000$ m und $b = 6356752.314$ m benutzt [HECK, 2003]. Damit können Positionsangaben ϕ, λ, h , die Breite, Länge und ellipsoidische Höhe erfolgen. Um Abstandsberechnungen durchführen zu können, wird eine näherungsweise Umrechnung der Breiten- und Längenunterschiede in metrische Werte unter Annahme einer mittleren Breite vorgenommen:

$$p_{i,x} = XFactor * p_{i,L} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

$$p_{i,y} = YFactor * p_{i,B} \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit:

$$P_{i,x} = \text{X-Koordinate des Punktes i} \quad [\text{m}]$$

$$P_{i,y} = \text{Y-Koordinate des Punktes i} \quad [\text{m}]$$

$$P_{i,L} = \text{Längengrad des Punktes i} \quad [\text{m}]$$

$$P_{i,B} = \text{Breitengrad des Punktes i} \quad [\text{m}]$$

$$X_{Factor} = 71885.29504029131$$

$$Y_{Factor} = 111226.6042735338$$

Analyse der Bewegungsspur hinsichtlich geometrischer Änderungen

Zu Beginn der Aufzeichnung einer Bewegungsspur wird der erste erfasste Punkt als Startpunkt gespeichert. In regelmäßigen Zeitabständen (1 Sekunde) werden die Positionen der Bewegungsspur analysiert. Für jede Analyse sind 3 Punkte erforderlich:

1. Startpunkt oder letzter gespeicherter Positionspunkt.
2. Vorletzter erfasster Positionspunkt zum Zeitpunkt t-1.
3. Letzter erfasster Positionspunkt zum Zeitpunkt t.

In einem nächsten Schritt wird geprüft, ob die Distanz von Punkt 2 zur gedachten Verbindungslinie zwischen Punkt 1 und Punkt 3 kleiner einer festgelegten Distanzschwelle

d ist. Tritt dieser Fall ein, so kann Punkt 2 aus der Datenreihe gelöscht werden, da keine signifikante Richtungsänderung festgestellt wurde. Andernfalls muss dieser Punkt gespeichert werden. Er wird somit als neuer Startpunkt (Punkt 1) für die weiteren Analysen.

Im Einzelnen sind die folgenden Berechnungen durchzuführen:

Abstand zwischen zwei Punkten in der X-und Y-Ebene:

$$d_{\vec{p},x} = p_{1,x} - p_{2,x} \quad \text{Gleichung 3-6}$$

$$d_{\vec{p},y} = p_{1,y} - p_{2,y}$$

$$d_{\vec{u},x} = p_{1,x} - p_{3,x}$$

$$d_{\vec{u},y} = p_{1,y} - p_{3,y}$$

mit:

$$d_x = \text{Abstand zwischen zwei Punkten in X} \quad [\text{m}]$$

$$d_y = \text{Abstand zwischen zwei Punkten in Y} \quad [\text{m}]$$

$$|(\vec{q} - \vec{p}) \times \vec{u}| = (d_{\vec{p},x} * d_{\vec{u},y}) - (d_{\vec{p},y} * d_{\vec{u},x}) \quad \text{Gleichung 3-7}$$

$$|\vec{u}| = \sqrt{(p_{3,x} - p_{1,x})^2 + (p_{3,y} - p_{1,y})^2} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

Mit dem Ergebnis von **Gleichung B-7** und **B-8** lässt sich der Abstand d errechnen:

$$d = \frac{(d_{\vec{p},x} * d_{\vec{u},y}) - (d_{\vec{p},y} * d_{\vec{u},x})}{\sqrt{(p_{3,x} - p_{1,x})^2 + (p_{3,y} - p_{1,y})^2}} \quad \text{Gleichung 3-9}$$

Die Berechnung der Distanzschwelle wird für jeden neu eingehenden Bewegungspunkt durchgeführt. Ist die Distanzschwelle kleiner 5 m, wird der Zwischenpunkt verworfen.

Analyse der Bewegungsspur hinsichtlich Änderungen von Geschwindigkeiten

Neben der Erhaltung der Geometrie der Bewegungsspuren sind auch Geschwindigkeitsänderungen zu erfassen. Während z.B. auf sehr langen geraden Streckenabschnitten zur geometrischen Abbildung der Bewegungsspur lediglich ein Start- und ein Endpunkt erforderlich ist, kann ein Fahrzeug auf der dazwischen liegenden Strecke deutliche Geschwindigkeitsänderungen vollziehen. Damit zentralenseitig diese Ereignisse erfasst werden, müssen an Stellen mit deutlicher Geschwindigkeitsänderung Zwischenpunkte gesetzt werden. Ein

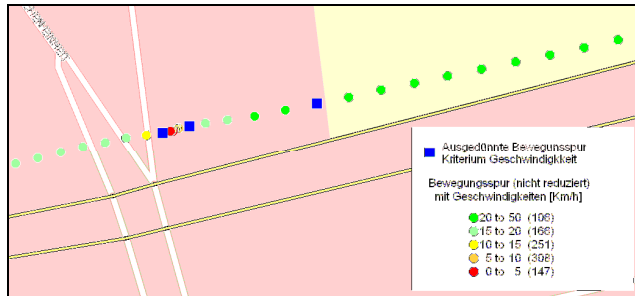


Bild 3-5: Reduzierung der Bewegungsspur unter Berücksichtigung von Geschwindigkeitsänderungen

Beispiel hierfür zeigt **Bild 3-5**. Vor einer Lichtsignalanlage wird die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs bis zum Stillstand reduziert. An Punkten signifikanter Änderungen der Geschwindigkeit werden Zwischenpunkte gesetzt (blaue Vierecke). Alle übrigen Punkte werden aus der Bewegungsspur gelöscht. Die Berechnung wird durch eine fortdauernde Analyse einzelner Bewegungspunkte

durchgeführt, die neben den Positionsdaten auch aktuelle Geschwindigkeiten beinhalten. Für alle eingehenden Positionspunkte wird eine mittlere Geschwindigkeit für einen Streckenabschnitt errechnet. Weicht die mittlere Geschwindigkeit um ein bestimmtes Maß (gewählt 30%) zu einem vorherigen Streckenabschnitt ab, wird ein weiterer Zwischenpunkt gesetzt. Alle übrigen Positionspunkte werden aus der Bewegungsspur gelöscht.

Kriterien der Datenreduktion

Die vom Ortungsmodul (z.B. GPS-Empfänger) des Mobiltelefons in 1-Sekunden-Intervall ermittelten Positionen werden bis auf wenige Zwischenpunkte verworfen, da diese für eine zentralenseitige Berechnung der Verkehrslage nicht erforderlich sind. Es reduziert sich somit das Datenaufkommen zwischen Mobiltelefon und der Zentrale beträchtlich. Eines der folgenden Kriterien muss erfüllt sein, damit ein Bewegungspunkt gespeichert und an die Verkehrsrechnerzentrale übertragen wird:

- Abweichung einer Position von einer gedachten Verbindungslinie d zwischen zuletzt gespeichertem Punkt und Folgepunkt von 5 Metern.
- Innerhalb der letzten 5 Minuten wurde keine Position gespeichert.
- Distanz zwischen letztem gespeichertem Punkt und aktueller Position größer 500 Meter.
- Die Geschwindigkeitsänderung v in einem aktuell befahrenen Streckenabschnitt ist größer 30% zum vorhergehenden Streckenabschnitt.

Verfahren Öffentlicher Verkehr

Im Öffentlichen Verkehr findet zentralenseitig ebenfalls ein so genanntes MapMatching statt.

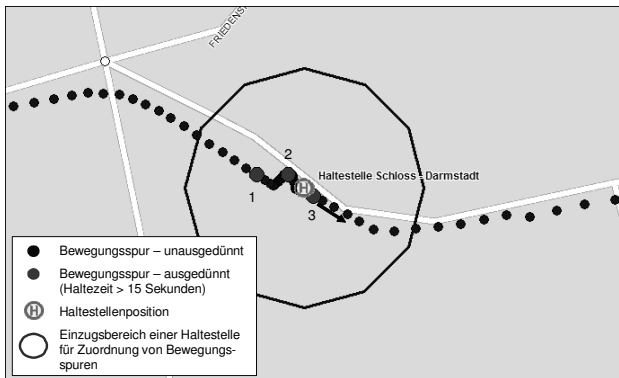


Bild 3-6: Reduktion von Bewegungsdaten im Öffentlichen Verkehr

Die Haltestellen sind dabei diejenigen Orte, an denen Informationen über mögliche Verspätungen von Bussen und Straßenbahnen ermittelt werden. Die Bewegungsspuren können daher soweit reduziert werden, bis nur noch die Ankunftszeiten an Haltestellen und die zugehörigen Positionen erhalten bleiben. Der tatsächliche Verlauf der zurückgelegten Strecke (Bewegungspositionen) muss nicht gespeichert werden.

Bei dem entwickelten Verfahren werden alle Positionsdaten aus der Bewegungsspur gelöscht, wenn sich das Fahrzeug in Bewegung befindet. Es werden fortdauernd räumliche Analysen durchgeführt. Werden Standzeiten größer 10 Sekunden festgestellt, werden drei Positionen (vgl. **Bild 3-6**) mit den folgenden Informationen an die Zentrale übertragen:

1. Positionspunkt: Annäherung an eine Haltestelle
2. Positionspunkt: Halteposition
3. Positionspunkt: Abfahrt an der Haltestelle

In der Zentrale wird dann durch einer geografische Abfrage überprüft, ob der Halt tatsächlich an einer Haltestelle stattgefunden hat. Es ist auch möglich, dass ein außerplanmäßiger Halt, z.B. an einer Lichtsignalanlage, zu der Fahrtverzögerung geführt hat. In diesem Fall sind keine weiteren zentralenseitigen Auswertungen durchzuführen.

Die folgende Vorgehensweise zur Spurausdünnung im öffentlichen Verkehr wurde entwickelt:

Prüfkriterien:

- Distanzlimit: 15 [m]
- Zeitlimit: 10 [s]

Prüfvorgang:

1. Aktuelle Position speichern
2. Ist aktuelle Position gegenüber Position vor 10 Sekunden (Kriterium: Zeitlimit) kleiner 15 Meter (Kriterium: Distanzlimit), dann hat ein Halt an einer Haltestelle oder auf freier Strecke stattgefunden. Der Abstand zweier Punkte wird nach **Gleichung 3-8** berechnet.
3. Speichern der Halteposition (Punkt 2 in **Bild 3-6**) und Annäherungsposition (Punkt 1).

4. Wird im weiteren Verlauf der Positionsermittlung eine neue Position festgestellt, deren Abstand größer 10 Meter (Kriterium: Distanzlimit) von der Halteposition (Punkt 2 in **Bild 3-6**) entfernt ist, kennzeichnet dies eine Abfahrt von der Haltestelle. Dieser Punkt entspricht Position 3 in **Bild 3-6**.

Ausschließlich die nach der zuvor beschriebenen Methode ermittelten drei Positionspunkte bei jedem Halt des ÖV-Fahrzeugs werden an die Verkehrsrechnerzentrale übertragen. Alle übrigen Positionspunkte der Bewegungsspur werden gelöscht.

3.5 Kommunikation

Um den Verkehrsteilnehmer während seiner Reise optimal unterstützen zu können, ist eine ständige Kommunikation zwischen Endgerät und Zentrale erforderlich. Da im Projekt COX Mobiltelefone bzw. Smartphones als mobile Endgeräte eingesetzt werden, kommt für die Kommunikation vor allem das GPRS-Netz in Frage. Das neu aufgebaute UMTS-Netz wird zukünftig eine stärkere Bedeutung erhalten. Da die Geräte immer leistungsfähiger werden und über moderne Schnittstellen wie WLAN und Bluetooth verfügen, sind auch diese Kommunikationsmedien zu integrieren. Die Kombination dieser Netze unter Verwendung geeigneter Strategien bietet einen Gewinn an Qualität und Quantität bei gleichzeitig überschaubarem, finanziellem Einsatz. So gibt es eine immer stärkere Verbreitung von WLAN-Hotspots, die in der Regel einen wesentlich kostengünstigeren Zugang zum Internet bieten, als dies über GPRS oder UMTS ermöglicht wird. Im Projekt COX wurde von der T-Systems-GEI in Ulm eine Kommunikationskomponente entwickelt, die automatisch zwischen verfügbaren Kommunikationsnetzen wechseln kann. Mögliche Netze sind GPRS, UMTS, WLAN und Bluetooth. Die Kommunikation zwischen dem mobilen Endgerät und der Verkehrsrechnerzentrale findet über eine gesicherte Internet-Verbindung statt. Steht für einen Zeitraum kein Kommunikationsnetz zur Verfügung, werden die Daten im Endgerät zwischengespeichert und bei einer späteren Netzverfügbarkeit übertragen.

Im Folgenden werden geeignete Kommunikationsnetze für Mobiltelefone beschrieben. Die Bestandsanalyse und Bewertung der verschiedenen Technologien ist im Projekt COX der Multimediainitiative Hessen **[MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002]** entstanden. Die Kommunikation zwischen Mobiltelefon und Verkehrsrechnerzentrale ist nicht Bestandteil der Verfahrensentwicklung „Floating Traveller Data (FTD)“. Da die Kommunikation eine wichtige Komponente der gesamten Funktionskette mobiler Lotsendienste im Verkehr ist, soll auf eine technische Beschreibung der einzelnen Merkmale an dieser Stelle nicht verzichtet werden.

3.5.1 GPRS - General Packet Radio Service

Technische Zusammenfassung

GPRS (General Packet Radio Service) ist eine paketorientierte Übertragungstechnik die viele Datenübertragungsprotokolle unterstützt. Ein weit verbreitetes Übertragungsprotokoll ist das IP-Protokoll. GPRS ist über das Standardmobilfunknetz verfügbar (nutzt die Frequenzkanäle des GSM-Netzes, 900/1800 MHz) und wird von fast jedem modernen Mobiltelefon unterstützt. Für die Übertragung der Datenpakete wird ein Kanal zeitgleich von mehreren Verbindungen genutzt. GPRS unterstützt sowohl Point-to-point Verbindungen (also Verbindungen von Teilnehmer zu Teilnehmer oder von Zentrale zu Teilnehmer) als auch Point-to-Multipoint (Zentrale zu mehreren Teilnehmern). Die zellenübergreifende als auch die providerübergreifende Verbindungsbereitstellung wird je nach Übertragungsqualität, Anzahl der Nutzer und verwendetem Mobilgerät, mit Geschwindigkeiten von 8-2048 KBit/s ermöglicht. Die Abhörsicherheit der physikalischen Datenübertragung wird durch geheime und temporäre Schlüssel gewährleistet.

Verfügbarkeit / Kosten

GPRS ist fast überall verfügbar, wo auch eine zum telefonieren (über das GSM-Netz) ausreichende Signalstärke und Qualität erreicht wird. Alle deutschen Mobilfunkprovider bieten GPRS in ihren Standardverträgen ohne Aufpreis an. Alle Provider rechnen die GPRS-Nutzung nach der übertragenen Datenmenge ab, wobei zusätzlich eine Nutzungsgebühr pro Tag/Stunde der GPRS-Nutzung zu entrichten ist. Mittlerweile sind auch Angebote über eine beschränkte/offene Flatrate für GPRS auf dem Markt, bei denen ein monatliches Datenübertragungsvolumen zu einem Festpreis erworben werden kann.

Bewertung

GPRS ist derzeit die einzige verfügbare Technologie, mit der mobile Endgeräte fast flächendeckend Daten empfangen und senden können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, zwischen der Zentrale und den Mobiltelefonen Daten über das IP-Protokoll auszutauschen.

3.5.2 UMTS - Universal Mobile Telecommunications System

Technische Zusammenfassung

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) tritt als Mobilfunkstandard der dritten Generation auf, der durch hohe Übertragungsraten optimal für multimediale Inhalte wie Videos, Bilder, usw., geeignet ist. Die Übertragungsraten betragen zwischen 144 KBit/s und 2 MBit/s. Die Datenübertragung kann auf Providerseite auf denselben Systemen wie GPRS realisiert werden. Außerdem steht das IP-Protokoll zur Datenübertragung zur Verfügung. Im Gegensatz zu GPRS werden für Daten- und Sprachdienste die gleichen Übertragungstechnologien genutzt. Die Abhörsicherheit / die Manipulierbarkeit der physikalischen Datenübertragung hat einen höheren Standart als im GSM/GPRS-Netz, die logische Sicherheit lässt sich über das verwendete Übertragungsprotokoll (SSL, VPN, ...) festlegen.

Verfügbarkeit / Kosten

Die Lizenznehmer der UMTS-Sendefrequenzen haben die Pflicht, bis Ende 2005 mindestens 50% (=8% Flächenabdeckung) der deutschen Bevölkerung mit UMTS-Diensten zu versorgen. In Gebieten, in denen kein UMTS-Netz verfügbar ist, wird generell das GSM-Netz als Rückfallebene genutzt (Sprach- und GPRS-Dienste). Die Grundkosten für UMTS-Datendienste sind ähnlich denen im GPRS-Netz. Datendienste werden im Normalfall nach Datenvolumen, Sprachdienste nach Zeit abgerechnet.

Bewertung

Generell ist UMTS als sehr geeignet für Verkehrsdienste auf mobilen Endgeräten einzuschätzen, da es eine schnelle, gesicherte Übertragung von allen möglichen Inhalten an das Endgerät und zurück gestattet. Die Verschlüsselungsstärke und Sicherheit bei der Authentifizierung prädestiniert UMTS für die Übertragung von sensiblen Informationen, um so z.B. Bezahl-/Buchungssysteme anbieten zu können oder um die Akzeptanz des Dienstes unter Datenschutzgesichtspunkten zu erhöhen.

3.5.3 WLAN – Wireless Lan

Technische Zusammenfassung

WLAN existiert aktuell in zwei zueinander nicht kompatiblen Versionen. Standard 802.11b im 2.4GHz Bereich mit 11Mbit/s und Standard 802.11a im 5GHz Bereich mit 54Mbit/s. Die Übertragungsraten geben jeweils die maximal möglichen Geschwindigkeiten an, in den Randbereichen der maximalen Übertragungreichweiten brechen diese Geschwindigkeiten jedoch ein. Die Übertragung erfolgt mit Spreizbandtechnik zur Erhöhung der Übertragungs- und Datensicherheit. Die theoretische Reichweite innerhalb von Gebäuden beläuft sich auf maximal 100 m, die theoretische Reichweite im Freien auf 400 m. Der genutzte Frequenzbereich ist lizenzfrei. Das Übertragungsprotokoll von WLAN benutzt das IP Protokoll. WLAN Verbindungen können AdHoc Verbindungen zwischen zwei Endgeräten oder Verbindungen zwischen einem Knotenpunkt und mehreren Endgeräten sein. Dieser Knotenpunkt selber kann wiederum an das Internet oder beliebige andere Netze angeschlossen werden. Die physikalische Sicherheit von WLAN ist relativ gering, der Zugriff wird maximal über eine Netzkennung geschützt.

Verfügbarkeit / Kosten

Betreiber von WLAN-Netzen sind derzeit vor allem Firmen und öffentliche Einrichtungen. Da WLAN-Netze lizenzfrei betrieben werden können, wird es in absehbarer Zeit tausende von WLAN-Netzen geben. Die Wenigsten davon werden jedoch dem Zweck dienen, einen öffentlichen Zugang z.B. zum Internet zu ermöglichen. Weit häufiger werden private und Firmennetze vorhanden sein. Dennoch ist durchaus eine breite Verfügbarkeit von öffentlichen WLAN-Netzen z.B. in Hotels, Bahnhöfen, Bus und Bahn, etc. zu erwarten.

Kosten für die Verbindung zum WLAN-Knotenpunkt sind je nach Anbieter unterschiedlich. Diese sind zum Teil kostenlos (z.B. an Universitäten), innerhalb von Hotels oder Bahnhöfen ist ein geringes Entgelt zu entrichten.

Bewertung

Die Nutzung von WLAN-Netzwerken bietet sich vor allem wegen des unkomplizierten Aufbaus und der kostenfreien Nutzung der Frequenzen an. Ein WLAN-Netzwerk zu errichten, ist praktisch für jedermann möglich. Die Teilnahme an einem WLAN-Netzwerk ist problemlos und erfordert wenig administrativen Aufwand. Ein Nachteil sind jedoch die praktisch nicht vorhandenen Sicherheitsmechanismen eines WLAN-Netzes. Um sensible Daten zu schützen, ist die Einrichtung eines VPN (verschlüsselte Verbindung zwischen zwei Internetteilnehmern) so gut wie unumgänglich.

3.5.4 Bluetooth

Technische Zusammenfassung

Bluetooth nutzt das Frequenzband: 2.4 GHz und für die Übertragung ein Frequenzsprungverfahren. Die Reichweite ist auf 10m – 100m begrenzt.

Die Datenraten belaufen sich auf 64 KBit/s synchron für Sprache, 721 KBit/s asynchron für Daten. Bis zu acht Bluetooth-Geräte können ein kleines Netz bilden. Bis zu 10 dieser Netze können zusammengefasst werden. Identifikationsmechanismen sind in Bluetooth nicht vorgesehen. Auf Protokollebene ist eine Identifikation durch Verwendung eines Passwortes möglich.

Verfügbarkeit / Kosten

Bluetooth wird vornehmlich für kurze und/oder kurzlebige Verbindungen eingesetzt. Für Netzwerke im allgemeinen Sinn ist die Bluetoothhardware aufgrund ihrer begrenzten Reichweite nicht ausgelegt. Möglich sind Netzwerke dennoch, z.B. zwischen mehreren Bluetoothgeräten oder durch je einen Access-Point pro Raum oder Fahrzeug. Bluetooth Accesspoints sind immer dann interessant, wenn sich Anwender über einen längeren Zeitraum örtlich sehr begrenzt aufhalten. Dies kann in Wartesälen (Bibliothek, Bahnhof, Flughafen, Arzt, Amt) wie auch an Haltestellen oder gar in Bussen und Bahnen der Fall sein.

Bluetooth-Netze stehen derzeit kostenlos zur Verfügung.

Bewertung

Bluetooth ist als flächendeckendes Netzwerk nicht geeignet. Eventuell kann Bluetooth zur Bereitstellung lokal begrenzter Informationen dienen. Ein Vorteil von Bluetooth Endgeräten gegenüber WLAN ist der wesentlich geringere Energieverbrauch.

3.5.5 Verknüpfung verschiedener Kommunikationsmedien

Zur Kommunikation stehen dem Endanwender verschiedene Kommunikationsnetze zur Verfügung. Im Einzelnen sind die Medien GPRS innerhalb eines GSM-Netzes, GPRS innerhalb eines UMTS-Netzes und WLAN nach Standard 802.11b sowie Bluetooth für die Kommunikation vorgesehen.



Bild 3-7: Schematische Darstellung der Kommunikation [MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002]

Die Kommunikation zwischen Mobilgerät und Server erfolgt über eine einheitliche Schnittstelle. Diese setzt sich zusammen aus Kommunikationsprotokoll (IP-Protokoll) und einer Steuer- und Zustandsschnittstelle. Der Datenaustausch erfolgt über die Kommunikationsprotokolle und ist für die Anwendungssoftware auf Client- und Serverseite transparent. Die Verbindung wird vom Mobilgerät automatisch über das jeweils passende Medium aufgebaut. Kriterien hierfür sind z.B. die Signalqualität, Kosten, Geschwindigkeit, und andere. Die Kriterien lassen sich jeweils über die Steuer- und Zustandsschnittstelle definieren und abfragen.

Die Bedingungen für das aktuell verwendete Medium werden ständig überprüft. Sollten die Umstände einen Medienwechsel anzeigen, z.B. weil das verwendete Netz nicht mehr in Reichweite ist oder ein alternatives Netz eine günstigere Übertragung ermöglicht, findet automatisch ein Medienwechsel statt. Der Medienwechsel selbst ist für die Anwendungssoftware transparent und findet ohne Datenverlust statt.

3.6 FTD-Verfahren – Motorisierter Individualverkehr

3.6.1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich die Ermittlung der Verkehrslage auf Autobahnen immer mehr zum Stand der Technik entwickelt. Im innerstädtischen Straßennetz hängt die Qualität des Verkehrsablaufs wesentlich von der Leistungsfähigkeit der Knotenpunkte ab. Die bei Überlastungen auftretenden Rückstaus sind ein maßgeblicher Indikator für die Verkehrslage. Die mittlere Rückstaulänge in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der Signalgruppen einzelner Zufahrten lassen sich nach Verfahren von [WU, 1990] und [WEBSTER, 1958] ermitteln. Im Rahmen des Ballungsraumprojekts Mobinet in München wurde eine Staulängenprognose unter Verwendung der genannten Verfahren in Verbindung mit einem Schätzverfahren durchgeführt [MÜCK, 2002].

Andererseits können mobile Endgeräte mit Ortungsfunktionalität Bewegungsinformationen an eine Zentrale übertragen. Die bislang entwickelten Verfahren der Floating-Car-Data (FCD) setzen allerdings voraus, dass insbesondere im Straßennetz ca. 5% bis 10% der Fahrzeuge mit einer entsprechenden Sensorik ausgestattet sind [BUSCH, 2004-2]. Fahrzeug-Flotten von z.B. Taxi-Unternehmen erscheinen eine geeignete Nutzergruppe für FCD zu sein. Sie stellen allerdings keine repräsentative Grundgesamtheit dar, da diese Fahrzeuge im Straßenraum oftmals bevorrechtigt fahren dürfen (z.B. Nutzung von Busspuren). Neben den in **Kapitel 3.1** definierten Anforderungen sind folgende Aspekte der Verfahrensentwicklung zu berücksichtigen:

- Validierung mobil erfasster Daten (Messgröße: Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung, Position) bei geringer Stichprobe durch Fusion mit stationär erhobenen Daten (Detektoren im Straßennetz; Messgröße: Verkehrsstärke).
- Vergleich online erhobener Daten mit historischen Daten.

Die Plausibilitätsprüfung mobil erfasster Daten erfordert eine tiefer gehende Betrachtung, da Einzelmesswerte der Geschwindigkeiten innerhalb eines Streckenabschnitts nicht als repräsentative Messgrößen für das aktuelle Verkehrsgeschehen anzusehen sind. So könnte beispielsweise ein bewusster Stopp eines Verkehrsteilnehmers (z.B. zur Orientierung) nicht von einem Stauereignis unterschieden werden. Liegen weitere Messwerte mobiler Datenherkunft vor, können diese miteinander verglichen werden. Bei sehr großen Schwankungen der Messwerte ist das Vertrauen in die gewonnenen Daten jedoch gering, da der Grund für die unterschiedlichen gefahrenen Geschwindigkeiten nicht bekannt ist (z.B. Stau oder bewusst langsame Fahrt einzelner Verkehrsteilnehmer). Daher werden alle eingehenden Daten durch einen „FTD-Bewertungskennwert“ beurteilt. Ist die Qualität der mobil erhobenen Daten nicht ausreichend, wird in dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, Einrichtungen der stationären Datenerfassung (Detektoren) zur weiteren Plausibilitätsprüfung heranzuziehen, da diese fortdauernd in großem Umfang Online-Daten liefern. Aus dieser sehr großen Datenbasis können Störungen und Abweichungen vom normalen Verkehrsgeschehen zuverlässig erkannt werden. Sie liefern vor allem im innerstädtischen Straßennetz nicht die in einzelnen Streckenabschnitten gefahrenen Geschwindigkeiten. Zudem erfassen sie in der Regel nur Zufahrten von

Knotenpunkten, die signalgeregelt sind. Am Beispiel von Darmstadt können nur etwa 2% aller Straßenabschnitte im Online-Betrieb erfasst werden.

Das entwickelte Verfahren nutzt daher die Informationen der Online-Detektion im Straßennetz an Lichtsignalanlagen und fusioniert diese Daten bereits frühzeitig mit den Bewegungsinformationen der mobilen Endgeräte (vgl. **Bild 3-8**).

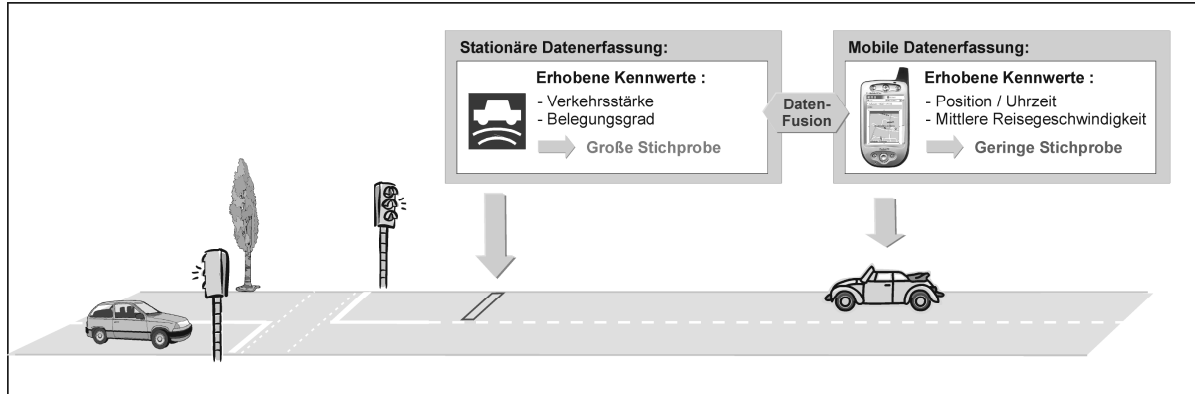


Bild 3-8: Prinzipskizze der Fusion stationär und mobil erfasster Daten im Motorisierten Individualverkehr

Aus den Daten der mobilen Erfassung mehrerer getrennter Fahrten lassen sich für einen Streckenabschnitt die folgenden Verkehrskenngrößen ermitteln:

- mittlere Fahrzeit,
- mittlere Fahrgeschwindigkeit,
- Summe der Standzeiten in einem Streckenabschnitt,
- Zeitverlust auf einem Streckenabschnitt.

Die wesentliche Eingangsgröße für Routingdienste ist die momentane Fahrgeschwindigkeit in einem Streckenabschnitt (vgl. **Kapitel 2.2.2**). Diese kann im städtischen Straßennetz nicht aus den Detektoren an LSA gewonnen werden, da diese einfache Induktionsschleifen sind, die zu Steuerungszwecken genutzt werden (vgl. **Kapitel 2.5.1**). Sind keine Sensoren zur Erfassung der Geschwindigkeit im Straßennetz verfügbar, müssen die Geschwindigkeitswerte ausschließlich aus mobil erhobenen Daten gewonnen werden. Aus den Daten allein können bei einer großen Verbreitung der Endgeräte (große Stichprobe) ausreichende Informationen zu Reisezeiten auf einem Streckenabschnitt abgeleitet werden.

Die mobil erhobenen Geschwindigkeiten werden zunächst auf ihre Plausibilität hin geprüft und mit Referenzwerten verglichen. Die Referenzwerte ergeben sich aus einer Vielzahl von Einzelmessungen. Wird eine signifikante Abweichung der mobil erhobenen Geschwindigkeitswerte von den Referenzwerten festgestellt, werden diese als zunächst nicht plausibel angesehen. Tritt dieser Fall ein, wird ein Vergleich mit den Kennwerten (Verkehrsaufkommen) der stationären Datenerfassung durchgeführt, aus denen, auf Grund des hohen Stichprobenumfangs, eine gesicherte Aussage zu möglichen Störungen im Verkehrsablauf abgeleitet werden kann. In dieser Arbeit wurden Verfahren entwickelt, die eine Ermittlung der Reisezeiten in einem Streckenabschnitt durch den Vergleich mobil und stationär erhobener Daten ermöglichen. Die einzelnen Aspekte werden im Folgenden erläutert.

3.6.2 Datenanalyse und integriertes Datenmodell

Stationär erhobene Daten

Datenerfassung

Innerstädtische, verkehrsabhängig geregelte Lichtsignalanlagen verfügen in den Zufahrten über Detektoren (Induktionsschleifen), die Zeitlücken und Belegungszeiten messen und an Steuergeräte der LSA weiterleiten. Folgende Eingangssignale werden i.d.R. erfasst:

- Belegung eines Detektors,
- Nichtbelegung eines Detektors,
- Belegungszeit und Zeitlücken.

Im Testgebiet Darmstadt liefern ca. 620 Detektoren Daten an den Verkehrsrechner. Die Informationen werden mit folgenden Kennwerten in Datenbanken hinterlegt:

- Zeitintervall [JJ:MM:TT:HH:MM],
- LSA-Nummer [-],
- Detektornummer [-],
- Verkehrsstärke [Kfz/15 min.],
- Belegungsgrad eines Detektors in einem Zeitintervall [% pro 15 min].

Die Daten werden über Lichtwellenleiter von den Steuergeräten der LSA am Ende eines Zeitintervalls an die Verkehrsrechnerzentrale übertragen.

Fehlererkennung und Ersatzwertbildung

Bei der Erfassung von Verkehrsdaten treten zeitweise fehlerhafte Messwerte und „Ausreißer“ auf, die identifiziert und herausgefiltert werden müssen. Es werden systematische und zufällige Fehler unterschieden [FGSV, 2003]. Systematische Fehler bei der Datenerfassung haben zwei Ausprägungen. Das Messsystem selbst kann falsche Werte liefern (unplausible, ausbrechende Messwerte). Schwieriger zu erkennen sind defekte oder falsch kalibrierte Erfassungssensoren.

Um auftretende Erfassungsfehler systematisch zu analysieren, werden in dieser Arbeit zwei Fehlerkategorien gebildet:

1. Ausfall von Messwerten
2. Ungenaue bzw. fehlerhafte Detektion des Verkehrsaufkommen

Beide Fehlerkategorien werden nachfolgend detailliert betrachtet.

Fehlerkategorie 1: Ausfall von Messwerten

Wie auch **LEHNHOFF [2005]** festgestellt hat, ist die Qualität der gemessenen Detektor-Daten sehr unterschiedlich. Auf einem untersuchten stark befahrenen Streckenabschnitt wurden im Januar und Februar 2004 tageszeitlich starke Schwankungen der Messwerte festgestellt (vgl. **Bild 3-9**).

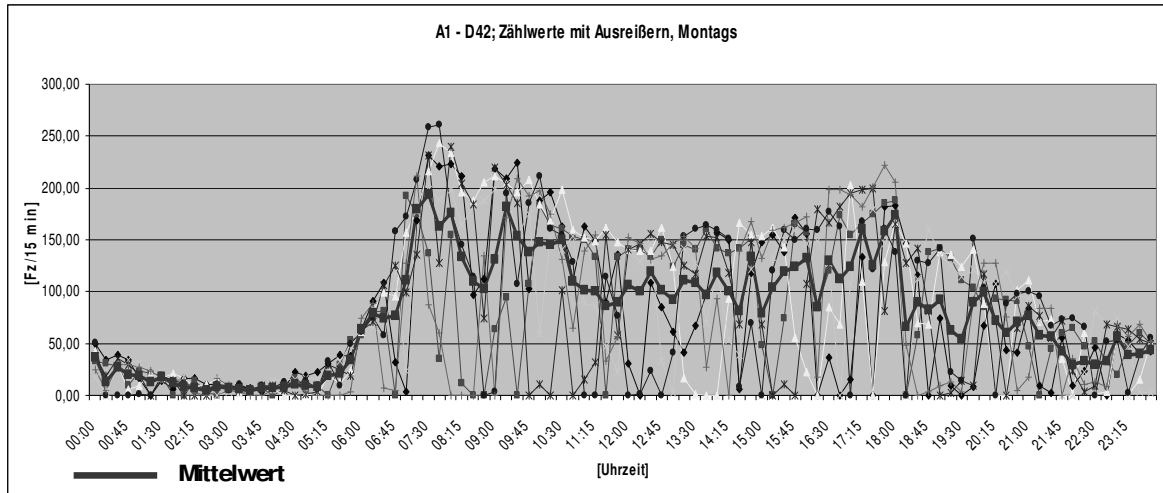


Bild 3-9: Zählwerte eines Detektors in Darmstadt (Knotenpunkt Rheinstraße / Am Kavalleriesand); 7 Montage im Januar / Februar 2004 mit Mittelwertbildung

In **Bild 3-9** sind Zeitreihen von Detektorzählwerten für 7 erfasste Montage im Januar und Februar 2004 dargestellt. Es ist auffällig, dass an einigen Tagen deutliche Einbrüche der Zählwerte zu erkennen sind. Es wurden zeitweise überhaupt keine Fahrzeuge mehr erfasst. Der Grund für diese auffälligen Messwerte konnte nicht ermittelt werden. Theoretisch könnte ein Unfall dazu geführt haben, dass eine Strecke kurzfristig gesperrt wurde und somit keine Fahrzeuge über den Detektor fahren konnten. Bei einer näheren Betrachtung der Ganglinien und der Häufigkeit der Messwerteinbrüche ist es wahrscheinlicher, dass Erfassungsfehler zu diesem Ergebnis geführt haben.

Um den Auffälligkeiten näher auf den Grund zu gehen, wurde eine systematische Analyse verschiedener Detektorwerte an unterschiedlichen Lichtsignalanlagen durchgeführt. Dabei wurden die eingehenden Zählwerte und Belegungsgrade näher untersucht. Auffällig war dabei, dass an vielen Detektoren regelmäßig Zählwerte $Z=0$ [Kfz/15 min] und Belegungsgrade $B=100$ [%] übertragen wurden. Dies würde bedeuten, dass ein Fahrzeug für das gesamte Zeitintervall den Detektor belegt hat. Ein Beispiel für diese Besonderheit zeigt **Bild 3-10**. Darin sind die auffälligen Wertekombinationen hervorgehoben. Diese unplausiblen Wertekombinationen konnten auch an anderen Signalanlagen beobachtet werden. Dazu wurden insgesamt 410 Tagesganglinien für Zählwerte und Belegungsgrade erzeugt und visuell nach Auffälligkeiten und regelmäßig auftretenden Fehlern untersucht.

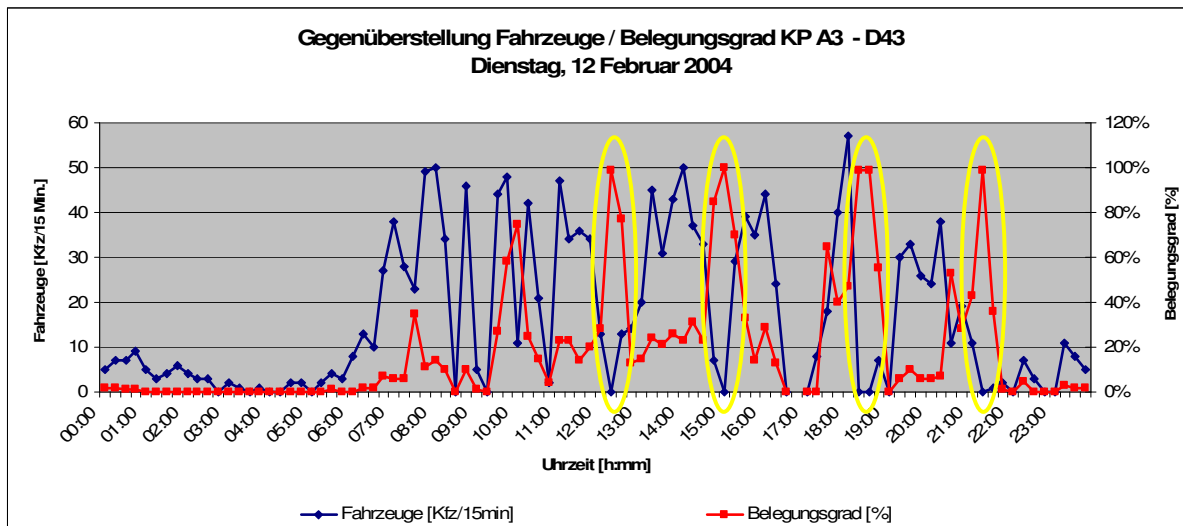


Bild 3-10: Gegenüberstellung von Detektordaten mit fehlerhaften Wertebereichen:
Zählwerte $Z=0$ [Kfz/15 min] und Belegungsgrade $B=100$ [%] (hervorgehoben)

Des Weiteren wurden regelmäßig Messwerte $Z=0$ [Kfz/15 min], $B=0$ [%] festgestellt. Dies ist zunächst als plausibles Resultat zu bewerten, da vor allem nachts sehr wenig Verkehr auf den Straßen zu verzeichnen ist. Treten diese Werte aber tagsüber, z.B. in den Spitzenstunden auf, müssen die Daten in Frage gestellt werden. Um herauszufinden, ob die Messwerte fehlerhaft sind, wurden benachbarte Detektoren am Knotenpunkt ebenfalls mit in die Analyse einbezogen. Das Ergebnis war, dass die offensichtlich fehlerhaften Daten an allen Detektoren einer LSA gleichzeitig erzeugt wurden. Teilweise wurden Messwerte $Z=0$ [Kfz/15 min], $B=0$ [%] an mehreren Signalanlagen im gleichen Zeitintervall festgestellt. Beispiele für diese Auffälligkeiten sind in **Bild 3-11** dargestellt.

KP A1 – Rheinstraße / Am Kavalleriesand, Darmstadt

KP A3 – Rheinstraße / Hindenburgstraße, Darmstadt

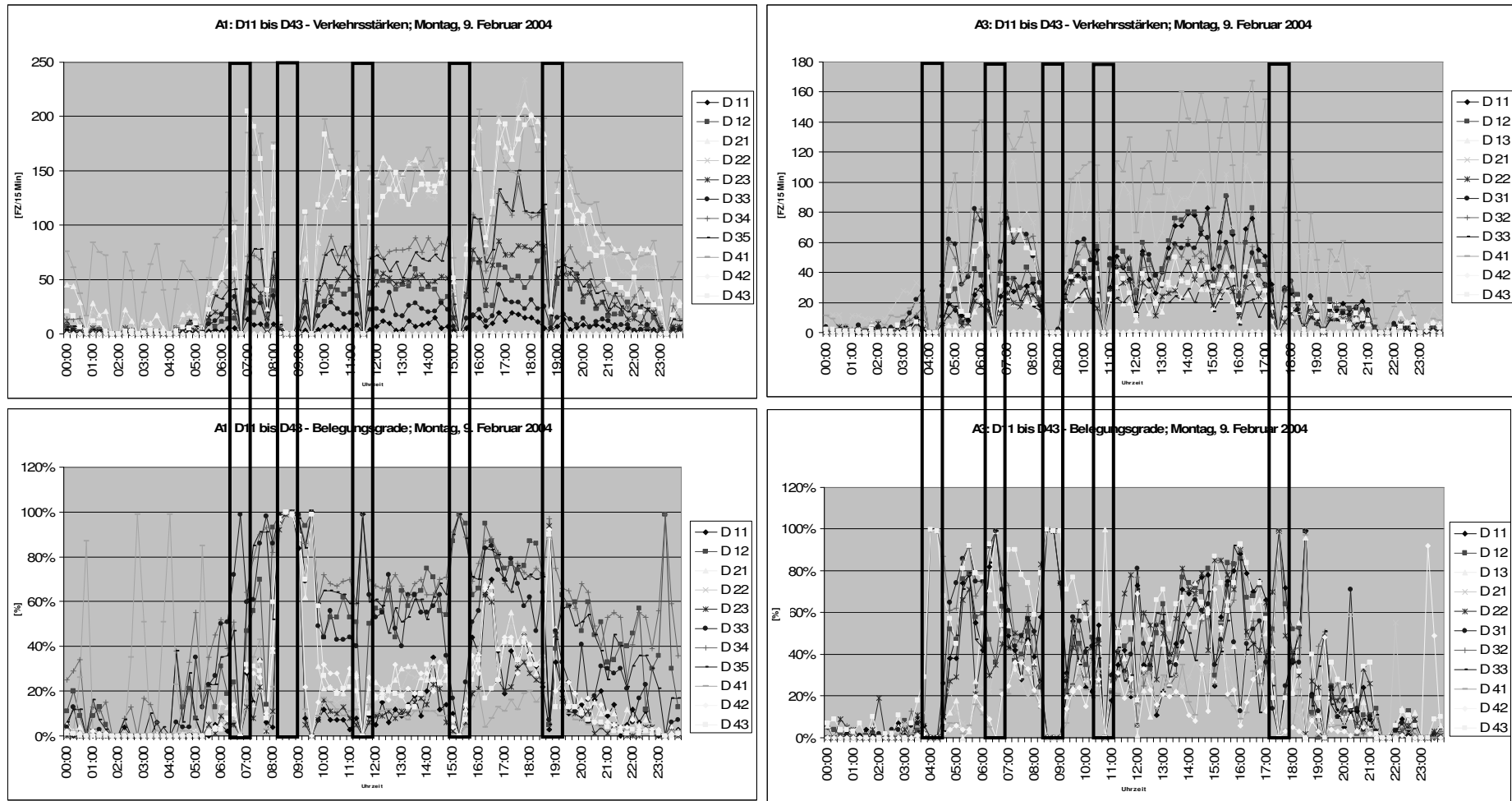


Bild 3-11: Erkennung fehlerhafter Detektorkennwerte (Zählwerte / Belegungsgrade) aus der Betrachtung aller Detektoren zweier benachbarter Knotenpunkte in Darmstadt am 9.2.2004

Die Analyse der Detektorganglinien zweier benachbarter Knotenpunkte in Darmstadt (vgl. **Bild 3-11**) lässt folgende Rückschlüsse zu:

- Zählwerte $Z=0$ [Kfz/15 min] und Belegungsgrade $B > 98\%$ sind nicht plausibel, da bei einer annähernden Dauerbelegung eines Detektors zumindest ein Fahrzeug gezählt werden müsste. Dieses Ereignis wird als Messwertausfall und nicht als Messungenaugigkeit eingestuft, da diese Messwertkombination realistischerweise nicht auftreten kann.
- Messwerte $Z=0$ [Kfz/15 min] treten in der Regel an allen Detektoren einer Signalanlage zeitgleich auf und sind als Messwertausfälle einzustufen.
- Zum Teil treten Messwertausfälle an benachbarten Signalanlagen zeitgleich auf (vgl. **Bild 3-11**, Zeitintervall von 8 bis 9 Uhr).

Die Ursachen für die Messwertausfälle konnten auch nach Rücksprache mit den Verantwortlichen der Stadt Darmstadt und dem Hersteller der Signalanlage nicht ermittelt werden. Es kann daher nur die Vermutung aufgestellt werden, dass Störungen in der Datenübertragung zwischen den Detektoren und den Steuergräten der Lichtsignalanlage die Ursache für die Fehler sind. Es besteht auch die Möglichkeit, dass die Steuergeräte der Lichtsignalanlagen kurzfristig gestört sind.

Die Ursachenerkennung und Fehlerbeseitigung ist Aufgabe einer Qualitätssicherung an Lichtsignalanlagen. Die Vorgehensweise dazu wurde in einem Forschungsprojekt des BMVBW vom Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt entwickelt [**BOLTZE, REUßWIG, 2005**].

Aus den erkannten Messwertausfällen wurde die folgende Fehlerbehandlung abgeleitet:

Zählwerte [Kfz/15 min]	Belegungsgrad [%]	Bemerkung
0	> 98	Messwertkombination kann so in der Realität nicht auftreten (unplausible Messwerte): Messwertausfall → Ersatzwertbildung
0	0	Messwertkombination tritt lediglich an einer Knotenpunktzufahrt auf → kein Messwertausfall; Werte werden verwendet
0	0	Treten Messwerte $Z=0$, $B=0$ an allen Detektoren der LSA und an allen Zufahrten im betrachteten Zeitintervall auf, handelt es sich um einen Messwertausfall → Ersatzwertbildung

Tabelle 3-6: Detektorkennwerte zur Erkennung von Messwertausfällen

Fehlerkategorie 2: Ungenau oder fehlerhafte Detektion des Verkehrsaufkommens

Im innerstädtischen Verkehrsnetz werden nach **LEHNHOFF [2005]** Zählwerte durch Detektoren selten mit einer guten Qualität erfasst. Es haben sich vier verschiedene Fehlertypen gezeigt, die zeitlich begrenzt oder während der gesamten Untersuchungsdauer auftraten:

1. Es werden zusätzliche Fahrzeuge benachbarter Fahrstreifen gezählt.
2. Es werden zusätzlich passierende Stadtbahnen als mehrere Fahrzeuge gezählt.
3. Es werden nicht alle Fahrzeuge sondern nur ein bestimmter Prozentanteil gezählt.
4. Es werden nicht existente Fahrzeuge gezählt.

Die in der Arbeit festgestellten Fehler und beschriebenen Erfahrungen lassen den Schluss zu, dass das absolut gemessene Verkehrsaufkommen selten mit dem tatsächlichen Verkehrsaufkommen übereinstimmt. Bei der Verwendung von Detektordaten müssen diese Erkenntnisse zwingend berücksichtigt werden.

In Darmstadt wurden keine Zählungen des Verkehrsaufkommens an einzelnen Detektoren durchgeführt. Daher kann keine Aussage zur Messgenauigkeit der Detektoren getroffen werden. Vor der Nutzung der Detektorwerte und der Beurteilung der Verwendbarkeit ist die eigentliche verkehrstechnische Anwendung näher zu definieren. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz der Erkennung von Störfällen bzw. Abweichungen vom „normalen“ Verkehrsablauf erfordert keine exakte Zählung des Verkehrs. Ist davon auszugehen, dass die nach **LEHNHOFF [2005]** ermittelten Fehler für einzelne Detektoren immer gleich bleibende Ungenauigkeiten verursachen, so ist das Verhältnis zwischen dem detektierten und dem tatsächlichen Verkehrsaufkommen gleich. Dies setzt voraus, dass es sich bei den Ungenauigkeiten um systematische Fehler handelt.

In den meisten Fällen werden an Lichtsignalanlagen Induktionsschleifendetektoren verwendet. Diese messen Veränderungen im elektromagnetischen Feld, das durch diese Detektoren aufgebaut wird. Die metallischen Eigenschaften von Kraftfahrzeugen verändern bei einer Annäherung an den Detektor das Magnetfeld. Diese Veränderung wird durch eine Messeinheit erfasst und ein Fahrzeug detektiert. Der Einfluss von Fahrzeugen, die nicht auf dem Detektor zugeordneten Fahrstreifen verkehren (z.B. Straßenbahnen, Lastkraftwagen mit einem sehr hohen metallischen Anteil) hängt sehr stark von der Kalibrierung des jeweiligen Detektors ab. Wird ein Detektor sehr empfindlich eingestellt, so kann die Erkennung von Fahrzeugen auf benachbarten Fahrstreifen häufiger auftreten als bei unempfindlicher Einstellung. So lange ein Detektor nicht kalibriert wird, so sind die Ungenauigkeiten des Detektors ähnlich. Durch Verschleiß bzw. Alterungsprozesse können sich die Ungenauigkeiten langsam verändern.

Ersatzwertbildung stationär erhobener Daten

Eine Ersatzwertbildung wird ausschließlich für die zuvor beschriebene Fehlerkategorie 1 „Ausfälle von Messwerten“ durchgeführt. Die Erkennung von ungenauen oder fehlerhaften Messwerten (Fehlerkategorie 2) ist für die hier vorgesehene Nutzung nicht relevant unter der Voraussetzung, dass es sich um systematische Messfehler handelt (vgl. auch vorheriger Abschnitt).

Auf die Fehlererkennung und die Ersatzwertbildung geht das Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen **[BAST, 1999]** ein. Das Merkblatt bezieht sich im Wesentlichen auf Streckenstationen an Bundesfernstraßen. Für die Berechnungen ist eine getrennte Erfassung von Pkw-Verkehrsstärken und Lkw-Verkehrsstärken erforderlich. Bereits diese Anforderung wird bei Detektoren an Lichtsignalanlagen nicht erfüllt, so dass die beschriebenen Verfahren nicht angewandt werden können.

Um diese Lücke zu schließen, sollen die „Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung verkehrstechnischer Anwendungen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen **[FGSV, 2003]** einen Lösungsbeitrag liefern. Es werden unterschiedliche Ebenen der Datenanalyse und Datenverbesserung betrachtet. Die erste Ebene beschreibt die Fehlerkorrektur einzelner verkehrstechnischer Anwendungen. Dazu gehört sowohl die Ersatzwertbildung als auch die Glättung von Messreihen, um den Einfluss von Ausreißern und Fehlmessungen zu verringern. Eingangsdaten sind die Rohdaten und eventuell historische Informationen der einzelnen Messstellen. Es wird empfohlen, die nach **[BAST, 1999]** vorgestellten Verfahren anzuwenden, die allerdings nicht für Detektoren an Lichtsignalanlagen gelten. Alternativ dazu werden Verfahren, die mit typisierten zeit- oder ereignisabhängigen Ganglinien arbeiten, erwähnt aber nicht weiter vorgestellt. Für die Berechnung sinnvoller Ersatzwerte können die Messwerte der vorangegangenen Intervalle extrapoliert oder Ersatzwerte aus typisierten Ganglinien übernommen werden. Typisierte Ganglinien entsprechen historischen Ganglinien, die unterschiedlichen Kategorien zugeordnet werden (z.B. unterschiedliche Wochentage, Ferien). Diese Thematik wird vertiefend in **Kapitel 3.6.3** behandelt.

LEHNHOFF [2005] hat durch eine systematische Analyse von Detektorwerten im innerstädtischen Straßennetz typische Erfassungsfehler klassifiziert (s.o.) und ein Verfahren zur Verbesserung der Datenqualität vorgeschlagen. Als Eingangsgrößen werden dazu die Planungsgrößen der Lichtsignalsteuerung, die Freigabezeiten der dem Detektor zugeordneten Signalgruppe sowie der Sättigungsgrad aller Verkehrsströme, die zur Lichtsignalanlage gehören, benötigt.

Es werden zulässige Verkehrsstärkebereiche festgelegt, in denen die aktuellen Detektorwerte schwanken dürfen. Werden Messwerte außerhalb des Gültigkeitsbereichs ermittelt, wird dieser offensichtlich falsche Messwert durch den Messwert der Ober- bzw. Untergrenze ersetzt.

Die Obergrenze des Verkehrsstärkebereichs errechnet sich unter anderem aus der Sättigungsverkehrsstärke einer Signalanlage, also der maximal möglichen Anzahl von Fahrzeugen die am Knotenpunkt in einem Zeitintervall abfließen kann. Diese wird abgemindert um Faktoren, die sich gemäß HBS **[FGSV, 2001]** aus dem Einfluss des Schwerverkehrs, der

Fahrstreifenbreite, des Abbiegeradius, der Fahrbahnlängsneigung und des Fußgängerlängsverkehrs ergibt. Ergänzend dazu führt **LEHNHOFF [2005]** einen Relevanzfaktor ein, der das gezählte Verkehrsaufkommen eines Detektors in einer Zufahrt in das Verhältnis zum detektierten Gesamtverkehrsaufkommen der Zufahrt setzt.

Die Untergrenze der gültigen Verkehrstärke, die durch einen Detektor gemessen werden darf, errechnet sich aus der innerhalb der Mindestfreigabezeit und der tatsächlich geschalteten Freigabezeit abfließenden Verkehrs. Dabei wird die Annahme getroffen, dass bei einer verkehrsabhängigen Signalsteuerung mindestens ein Fahrzeug eine Signalfreigabe anfordert. Ist die tatsächliche Freigabezeit länger als die Mindestfreigabezeit bedeutet dies, dass zusätzlich zu dem Fahrzeug, welches die Freigabezeit aktiviert hat, mindestens ein Fahrzeug vor Ende der Mindestfreigabezeit den Detektor aktiviert haben muss. Diesem Fahrzeug folgen in einem Abstand, der nicht länger als die Bemessungszeitlücke sein darf, weitere Fahrzeuge, die die Freigabezeit weiter verlängern.

Durch das von **LEHNHOFF [2005]** entwickelte Verfahren konnte eine Verbesserung der Erfassungsgenauigkeit von Detektoren nachgewiesen werden. Für das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Verfahren wurden Freigabezeiten der jeweiligen Lichtsignalanlagen nicht mit einbezogen, da diese nicht an den Verkehrsrechner in Darmstadt übermittelt werden. Gleichzeitig sollte ein allgemeingültiges Verfahren definiert werden, das auch auf Autobahnen anwendbar ist.

In der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz verfolgt, dass die erkannten Messwertausfälle gemäß **Tabelle 3-6** durch geeignete Werte zu ersetzen sind. Da die ausgewerteten Detektorwerte in Darmstadt bereits seit zwei Jahren Messwerte an den Verkehrsrechner in Darmstadt liefern, liegen für jedes Zeitintervall der einzelnen Detektoren eine sehr große Anzahl von Messungen vor. Als Ersatzwerte werden Mittelwerte der einzelnen Referenzganglinien für den entsprechenden Detektor und das fehlerhafte Zeitintervall eingesetzt. Die Vorgehensweise zur Bildung der Referenzganglinien ist in **Kapitel 3.6.3** beschrieben.

Die Verfahren zur Fehlererkennung und Ersatzwertbildung wurden auf die untersuchten Ganglinien angewendet. Dadurch konnten vereinzelt auftretende Messwertausfälle durch geeignete Ersatzwerte ausgeglichen werden. Ein Beispiel zweier Referenzganglinien mit und ohne Erfassungsfehler eines Detektors mit einer Datenverbesserung zeigt **Bild 3-12**. Deutliche Einbrüche in den Referenzganglinien, verursacht durch fehlerhafte Detektordaten in einzelnen Ganglinien (z.B. im Zeitintervall 8:30-9:30 Uhr und 18:00-18:30 Uhr), wurden durch das entwickelte Verfahren eliminiert.

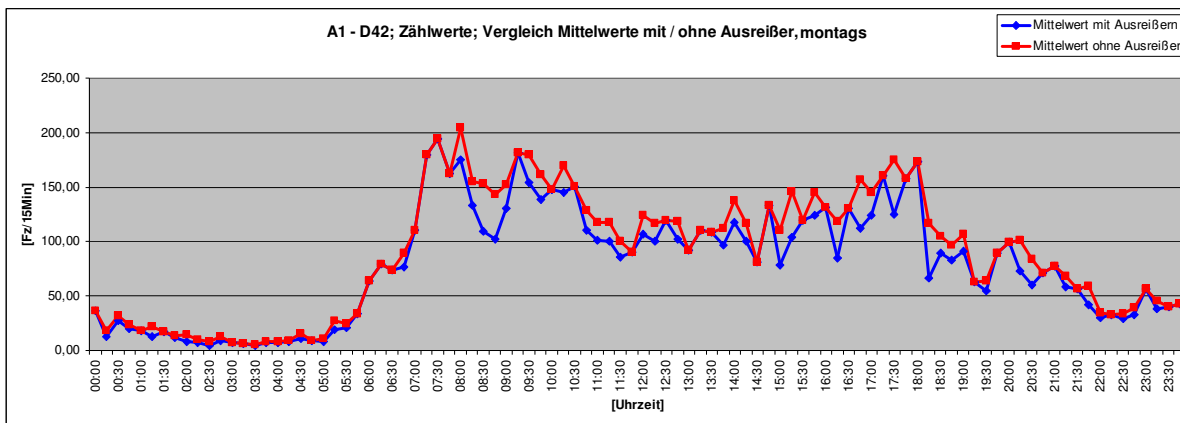


Bild 3-12: Gegenüberstellung einer Detektor-Referenzganglinie mit und ohne Erfassungsfehler (7 Montagsganglinien wurden erfasst)

Mobil erhobene Daten

Bei der Entwicklung von Methoden zur Ermittlung der Verkehrslage im Motorisierten Individualverkehr ist zu berücksichtigen, dass die Verbreitung von Endgeräten mit mobiler Datenerfassung zunächst gering ist. Das zu entwickelnde Verfahren soll daher auf der Grundlage historischer Daten (Referenzwerte der mittleren momentanen Geschwindigkeiten) eine Bewertung der mobil erhobenen Daten vornehmen können. Beim Aufbau einer Referenzdatenbasis ist es sinnvoll, eine Klassenunterteilung in einzelne Wochentage und Sonderereignisse etc. vorzunehmen. Auf diese Thematik zur Bildung von Referenzganglinien aus Detektorwerten wird in **Kapitel 3.6.3** ausführlich eingegangen. Eine ähnliche Vorgehensweise ist auch für mobil erhobene Daten anzuwenden.

Um die Referenzdatenbasis der Geschwindigkeiten auf einzelnen Streckenabschnitten berechnen zu können, wird die Bewegungsspur im mobilen Endgerät ausgedünnt und anschließend an eine Zentrale übertragen. In der Zentrale wird ein so genannter MapMatching-Prozess gestartet, der eine Zuordnung der Bewegungsspur zu Elementen der Straßendatenbank vornimmt. Als Ergebnis des MapMatching-Prozesses wird eine Strecken-Nummer und die Reisezeit des befahrenen Streckenabschnittes für dieses Einzelereignis ermittelt.

Zuordnung von Bewegungsspuren zu Datenmodell (MapMatching)

Die vom Verkehrsteilnehmer befahrenen Streckenabschnitte werden durch die Aufzeichnung und Übertragung der Bewegungsspuren vom mobilen Endgerät erhoben. Die in einer Zentrale eintreffenden Bewegungsspuren werden gespeichert. Aus ihnen allein können jedoch noch keine Rückschlüsse auf die in den einzelnen Streckenabschnitten gefahrenen Geschwindigkeiten gezogen werden. Hierzu muss zunächst die Bewegungsspur durch ein so genanntes MapMatching-Verfahren einzelnen Streckenabschnitten (Kanten), die durch ein Knoten-Kanten-Modell in Datenbanken hinterlegt sind, zugeordnet werden. Diese Aufgabe übernimmt innerhalb des Projekts COX ein MapMatching-Modul der Firma PTV AG. Beim MapMatching werden Kriterien wie Position, Bewegungsrichtung, Abstand der Einzel-Posi-

tionen von den Kanten, Häufung von Positionsdaten auf einzelnen Kanten berücksichtigt. Ein Beispiel eines MapMatching-Ergebnisses einer Testfahrt zeigt **Bild 3-13**.

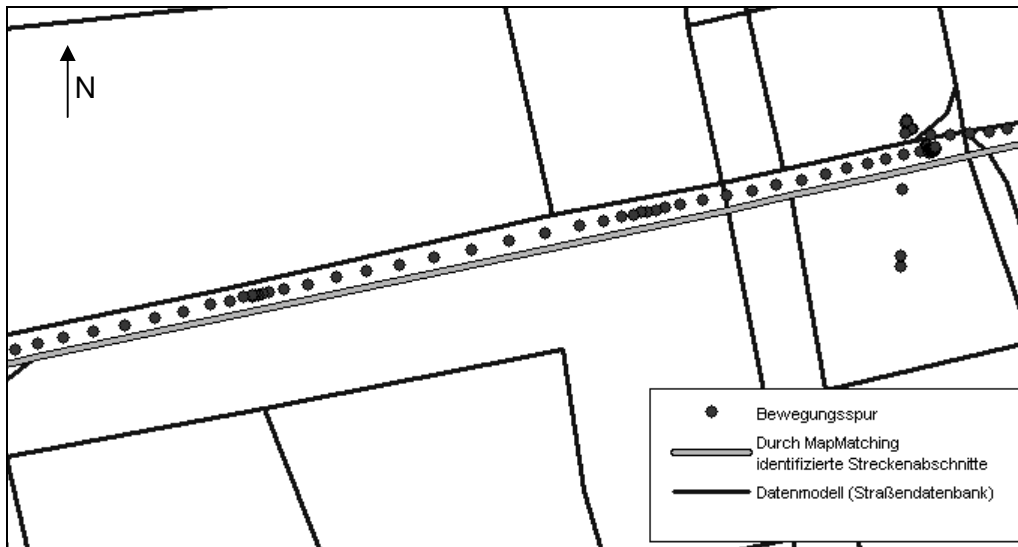


Bild 3-13: MapMatching-Ergebnis einer Testfahrt (Fahrtrichtung Ost)

Der in **Bild 3-13** dargestellte Streckenabschnitt wurde in östlicher Richtung befahren. Die Bewegungsspur mit den in 1-Sekunden-Intervallen aufgezeichneten Positionspunkten werden durch das MapMatching-Verfahren den jeweiligen Streckenabschnitten zugeordnet. Obwohl die Bewegungsspur zwischen zwei parallel verlaufenden Abschnitten verortet ist, wird nur ein Abschnitt erkannt. Dieses korrekte Ergebnis hängt damit zusammen, dass der obere Abschnitt nur in westlicher Richtung und der untere in östlicher Richtung befahren werden darf.

Neben der Streckenerkennung ist die Ermittlung der Einzelgeschwindigkeiten auf den Kanten ein wichtiger Prozess. Das Attribut der Geschwindigkeit wird für alle weiteren Berechnungen innerhalb der FTD-Verfahren verwendet und ist daher korrekt in den Datenbanken zu hinterlegen.

Elimination von Erfassungsfehlern

Bislang konnten keine Erfassungsfehler mit mobilen Endgeräten festgestellt werden. Die Ortungsgenauigkeit wird durch das Ortungsmodul bestimmt. Das MapMatching-Programm gibt nach erfolgreicher Zuordnung der Bewegungsspur zum Streckenabschnitt ein Gütekriterium an die Verkehrsrechnerzentrale zurück, aus dem Rückschlüsse auf auszuschließende Messwerte gezogen werden können.

3.6.3 Datenaufbereitung - Bildung von Tagesganglinien als Referenzbasis

Stationär erhobene Daten

Viele Anwendungsbeispiele in der Verkehrstechnik basieren auf der Auswertung von Zeitreihen, die eine typische Verkehrsentwicklung für bestimmte Tage und Ereignisse abbilden [BOLTZE, 1994], [SCHNABEL, LOHSE, 1997], [VON DER RUHREN, 2000]. Vollautomatisch erfasste Verkehrsdaten können in einer Verkehrsrechnerzentrale zusammengeführt und für verkehrstechnische Aufgaben genutzt werden (z.B. bei Knoten-, Strecken- oder Netzbeeinflussungsanlagen) [PETERS, 2005]. Dabei werden die Daten vornehmlich zur Darstellung von aktuellen Ist-Zuständen herangezogen. Neben den klassischen Aufgaben können automatisiert erhobene Daten aber auch für speziellere Fragestellungen, z.B. der Störungsanalyse und zur Verkehrsprognose, herangezogen werden.

Eine Möglichkeit, verkehrstechnische Daten für unterschiedliche Einsatzgebiete bereitzustellen, ist der Aufbau einer Referenzbasis. In dieser werden verkehrstechnische Informationen (z.B. Verkehrsaufkommen, Belegungsgrad von einzelnen Detektoren) zusammengeführt und verwaltet. Für den Aufbau dieser Referenzbasis wird die Regelmäßigkeit bestimmter Verkehrsmuster aus der Vergangenheit ausgewertet, um Aussagen über zukünftige Verkehrssituationen treffen zu können. Die abzubildenden Verkehrsmuster werden je nach Anwendungsgebiet auf unterschiedliche Weise erfasst (z.B. automatische Verkehrserfassung von Detektoren, Floating-Car-Data). Ziel einer solchen Analyse ist die Ableitung wiederkehrender Muster. Daneben ist es auch möglich, Veränderungen gegenüber dem „normalen“ Verkehrsgeschehen schnell und zuverlässig zu erkennen. Diese Abweichungserkennung ist für den Vergleich mit mobil erhobenen Daten auf den zum jeweiligen Detektor gehörigen Streckenabschnitten erforderlich. Ausführlich wird auf die Datenfusion in **Kapitel 3.6.4** eingegangen. An dieser Stelle soll das entwickelte Verfahren der Referenzbildung als Referenzbasis vertieft werden.

Der Aufbau einer Referenzbasis ist ein fortschreitender Prozess, da täglich neue Messwerte bzw. Ganglinien verarbeitet werden und somit die Referenzbasis verbessern. Die Höhe des Verkehrsaufkommens zu einzelnen Tageszeiten hängt von vielen Faktoren wie z.B. Wochentage, Verkehrsstörungen, Feiertage, Veranstaltungen, Ferien und Wetterbedingungen ab. Die Wiederholung bestimmter Verkehrsabläufe bei unterschiedlichen Faktoren kann durch Referenzganglinien wiedergegeben werden. **JANKO [1994]** nimmt dazu eine grobe Unterteilung in drei Klassen (Montag bis Freitag, Samstag, Sonn- und Feiertag) vor und begründet dies in der Ähnlichkeit des Verkehrsaufkommens an einzelnen Wochentagen. **WILD [1996]** beschreibt ein Modell zur Ganglinienklassifikation anhand verfeinerter Klassen, bei dem zunächst Grundklassen gebildet werden, die den typischen Verlauf einer Tagesganglinie wiedergeben. Vorteil einer detaillierten Ganglinienklassifizierung ist die Verbesserung der Verkehrsprognose vor allem bei besonderen Ereignissen (z.B. Veranstaltungen). In der vorliegenden Arbeit wird aufbauend auf den Grundklassen eine Ableitung von Sonderklassen durchgeführt.

In **Grundklassen** werden vorhersehbare Ereignisse zusammengeführt. Hierzu gehören beispielsweise:

- Werktage (Mo, Di, Mi, Do, Fr als eigene Klasse),
- Samstage,
- Sonn- und Feiertage,
- Ferien (Sommerferien, Winterferien etc. als eigene Klassen),
- Wochentage mit „Brückentagen“,
- Sportveranstaltungen,
- kulturelle Veranstaltungen,
- Wochenmärkte,
- verkaufsoffene Sonn- und Feiertage,
- Baustellen,
- etc.

In **Sonderklassen** werden unvorhersehbare Ereignisse zusammengeführt. Hierzu können gehören:

- Verkehrsbehinderungen, Verkehrsunfälle,
- Wetterbedingungen (Schnee, Eis, Sturm als eigene Klasse).

Die Bildung der Grundklassen ist durch die Definition eines Jahreskalenders und die Zuordnung der einzelnen Jahrestage zu den definierten Grundklassen vorzunehmen. Es können dabei auch unterschiedliche Kombinationen auftreten (z.B. Montag + Ferien, oder Montag + „Brückentag“).

Ein hoher Detaillierungsgrad der einzelnen Ganglinienklassen setzt allerdings eine über einen längeren Zeitraum erhobene Datenbasis voraus, um einen ausreichend großen Stichprobenumfang und somit eine gesicherte Aussage treffen zu können.

Da die Detektordaten des Verkehrsrechners in Darmstadt seit Januar 2004 zur Verfügung standen und eine detaillierte Analyse von Einzelereignissen in den vergangenen Jahren daher nicht durchgeführt werden konnte, wurden die folgenden sieben Grundklassen gebildet:

- Werktage (Mo, Di, Mi, Do, Fr als eigene Klasse),
- Samstage,
- Sonn- und Feiertage.

Weitergehende Unterteilungen der Klassen sind zukünftig anzustreben, da bislang beispielsweise Feiertage oder städtische Großveranstaltungen nicht separat behandelt werden. Auch führen unterschiedliche Feiertagsregelungen in den Bundesländern zu einem starken Einkaufsverkehr in den Grenzbereichen, die ebenfalls in separaten Klassen zu berücksichtigen sind.

Für jede der definierten Klassen wird die Berechnung einer Referenzganglinie der Detektorzählwerte durchgeführt. Daraus können im Online-Betrieb mögliche Störungen erkannt und Verkehrsprognosen gegeben werden.

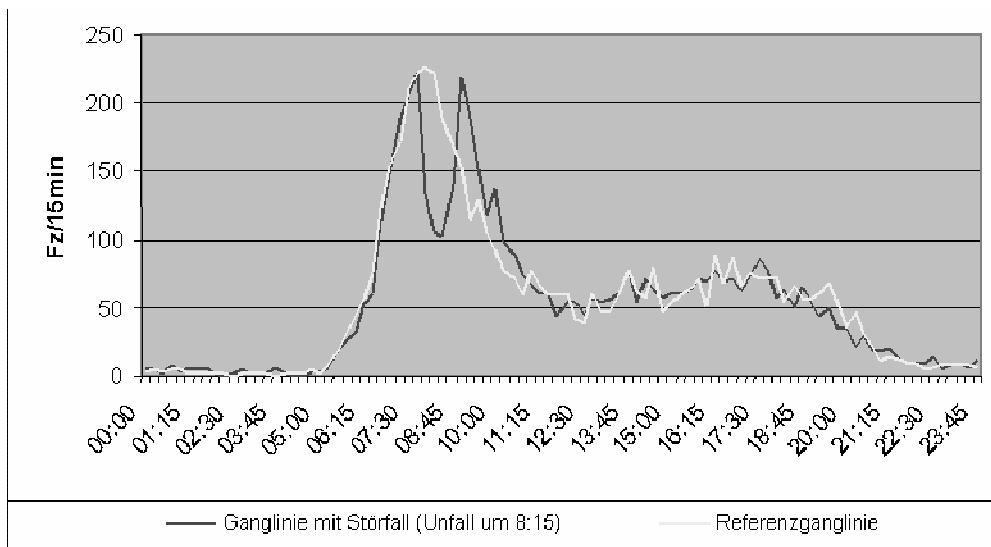


Bild 3-14: Gegenüberstellung einer Referenzganglinie (Kraftfahrzeuge je 15 Minuten) und Ganglinie mit einem Störfall

Der vollständige Verfahrensablauf zur Bildung von Referenzganglinien ist in **Bild 3-15** zusammengefasst. Grob lässt sich das Verfahren in zwei Hauptblöcke unterteilen, wonach entweder eine neue Referenzganglinie einer Klasse gebildet wird, oder eine bestehende Referenzganglinie mit einer neu erhobenen Tagesganglinie verbessert wird. Ob eine bestehende Referenz verbessert werden soll, wird zunächst durch eine Korrelationsrechnung geprüft. Aktuelle Tagesganglinien können stark von der Referenz abweichen (z.B. bei Großveranstaltungen). Diese gesondert zu behandelnden Ganglinien werden zur automatisierten Ermittlung neuer Ganglinienklassen zwischengespeichert.

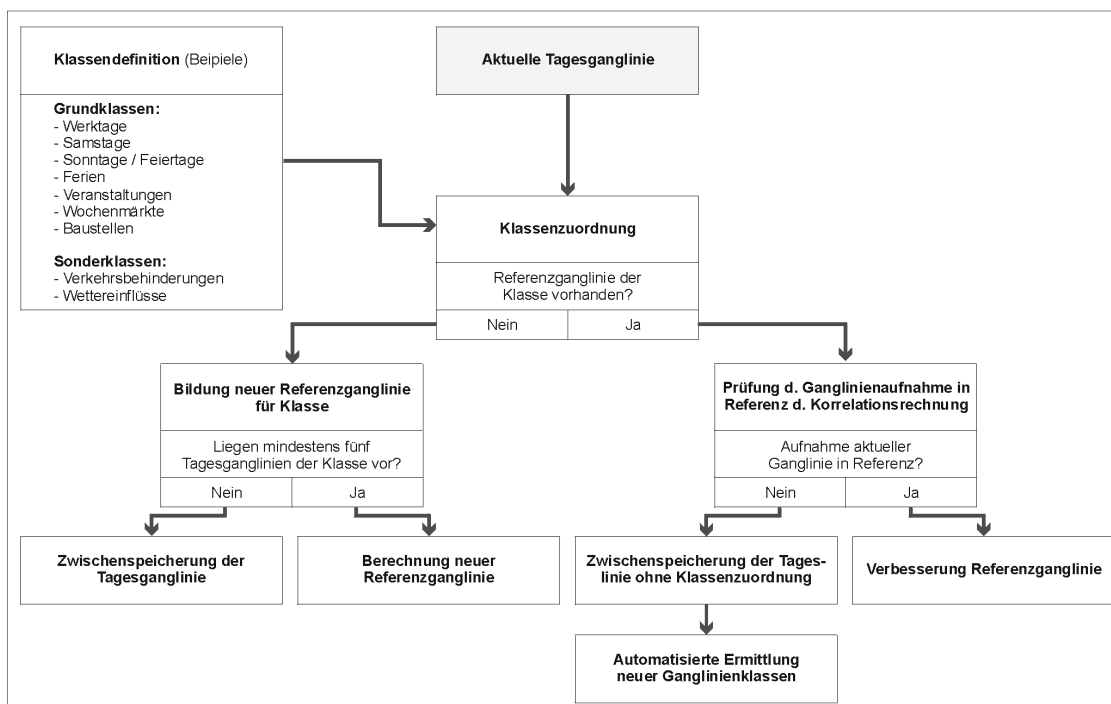


Bild 3-15: Verfahrensablauf zur Bildung neuer Referenzganglinien

Mittelwertbildung*Keine Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden*

Wenn neue Detektoren in das System integriert werden, hat i.d.R. noch keine Berechnung einer Referenzganglinie für die Tagesklasse stattgefunden. Es wird daher zunächst ein Datenpool aufgebaut, in dem eine Mindestanzahl von Tagesganglinien (z.B. Montage) gespeichert wird. Für Berechnungen in dieser Arbeit wurden fünf Ganglinien als Grundlage verwendet. Aus den gespeicherten Messreihen kann durch arithmetische Mittelwertbildung eine Referenzdatenbasis berechnet werden, die im Weiteren allerdings durch neue Ganglinien verbessert wird.

Die eingehenden Detektordaten werden in Betrachtungsintervalle aggregiert. Nach **PETERS [2005]** haben sich Zeitintervalle mit einer Länge von 15 Minuten bewährt. Die Aggregation bewirkt eine Glättung der Daten, die einen Vergleich mit anderen Ganglinien erleichtert. Somit ergeben sich für einen Tag 96 Erfassungsintervalle für eine Tagesganglinie. Da gelegentlich Messwertausfälle auftreten, sollte eine Tagesganglinie als gültig bewertet werden, wenn mindestens 80 Zeitintervallwerte (also für 20 Stunden) bei einer Zeitintervalllänge von 15 Minuten vorhanden sind. Für jedes Zeitintervall werden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung mit den für dieses Zeitintervall vorliegenden gültigen Werten errechnet. Wenn beispielsweise in 2 der 5 Ganglinien keine Messwerte vorliegen, dann ist der Mittelwert mit den 3 vorliegenden gültigen Werten zu berechnen. Die Mittelwertbildung wird für jedes Zeitintervall durchgeführt nach:

$$\bar{Z}_i = \frac{\sum_{j=1}^n Z_i(j)}{n_i} \quad \text{Gleichung 3-10}$$

mit:	\bar{Z}_i	= Mittlerer Zählwert im Zeitintervall i (z.B. 7:15 -7:30 Uhr)	[Kfz / 15 min]
	$Z_i(j)$	= Zählwert der Messreihe j im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	j	= Messreihe j	[-]
	n_i	= Anzahl der Messwerte im Zeitintervall i	[-]

Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Nach Beendigung der „Trainingsphase“ wird im Datenmodell immer nur die Referenzganglinie abgelegt. Dies reduziert das Datenaufkommen in der Datenbank erheblich und ermöglicht einen schnellen Datenzugriff und kurze Berechnungszeiten. Erfahrungen in Darmstadt haben gezeigt, dass innerhalb von 6 Monaten etwa 3,5 Mio. Datensätze mit Detektorwerten in der Datenbank verwaltet wurden. Datenbankabfragen für einen einzelnen Detektor haben daher einen sehr langen Zeitraum in Anspruch genommen. Daher ist es sinnvoll, ausschließlich die Referenzganglinien für die weiteren Berechnungen zu verwenden.

Da der vollständige Datenbestand aller Tagesganglinien nicht mehr zur Verfügung steht, wird das arithmetische Mittel der neuen Referenzganglinie aus der bisherigen Referenzganglinie und der aufzunehmenden neuen Tagesganglinie wie folgt berechnet werden:

$$\bar{Z}_{i,neu} = \frac{\bar{Z}_{i,alt} * n_{alt} + Z_i(j)}{n_{neu}} \quad \text{Gleichung 3-11}$$

$$n_{neu} = n_{alt} + 1 \quad \text{Gleichung 3-12}$$

mit:

$\bar{Z}_{i,neu}$	= Neuer mittlerer Zählwert im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
$\bar{Z}_{i,alt}$	= Alter mittlerer Zählwert im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
$Z_i(j)$	= Zählwert der neuen Messreihe j im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
n_{alt}	= Anzahl der Messwerte in bisheriger Referenzganglinie	[-]
n_{neu}	= Anzahl der Messwerte nach Aufnahme der Tagesganglinie	[-]
i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
j	= Messreihe	[-]

Das beschriebene Verfahren ermöglicht die Verbesserung der Referenzganglinien um die aktuell detektierten realen Verkehrsumstände. Das beschriebene Verfahren führt zu einer gewissen „Trägheit“ bei der Anpassung der Referenzganglinie. Bei einer großen Anzahl n_{alt} bereits gespeicherter Tagesganglinien kann der Einfluss einer neuen Ganglinie gering werden. Um dieser „Trägheit“ entgegenzuwirken, kann n_{alt} auf eine Obergrenze beschränkt werden (z.B. $n_{alt} = 10$).

Standardabweichung

Neben der Mittelwertbildung für jedes Zeitintervall ist eine Berechnung der Standardabweichung erforderlich. Die Standardabweichung ist das Maß der Streuung einzelner Messwerte um das Mittel. Auch hierbei wird wieder unterschieden, ob Detektoren neu in das System integriert werden sollen („Trainingsphase“) oder ob Referenzganglinien bereits berechnet wurden. Die Standardabweichung wird für die Definition eines Vertrauensbereichs der Referenzganglinie benötigt. **PETERS [2005]** beschreibt, dass diese Vertrauensbereiche unterschiedlich durch Korridore fester Breite oder durch prozentuale Anteile des Zählwertes gebildet werden könne. Ein prozentualer Korridor ist bei schwankenden Ganglinien allerdings problematisch, da er sich bei kleinen Werten stark verengen kann. **VON DER RUHREN [2000]** und **LEHNHOFF [2005]** definieren ebenfalls Vertrauensbereiche, die in Abhängigkeit vom möglichen minimalen und maximalen Verkehrsabfluss in einem Streckenabschnitt Messwerte als gültig oder ungültig bewerten.

Im innerstädtischen Verkehrsnetz hängt an signalgeregelten Knotenpunkten die abfließende Verkehrsmenge einer Zufahrt maßgeblich von der Freigabezeit ab. Für das in der vorliegen-

den Arbeit beschriebene Verfahren wurden Freigabezeiten der jeweiligen Lichtsignalanlagen nicht mit einbezogen, da diese nicht an den Verkehrsrechner in Darmstadt übermittelt werden. Gleichzeitig sollte ein allgemeingültiges Verfahren definiert werden, das auch auf Autobahnen anwendbar ist.

Der hier verfolgte Ansatz nutzt die Standardabweichung der einzelnen Zählwerte der Referenzganglinie und verwendet diese als Ober- bzw. Untergrenze. Für jedes Zeitintervall definiert sich der Vertrauensbereich aus Mittelwert zuzüglich bzw. abzüglich der Standardabweichungen. Tests dieses Verfahrens haben gezeigt, dass vor allem nachts oder innerhalb der Spitzenstunden nur geringe Verkehrsschwankungen bzw. Standardabweichungen zu beobachten waren. Damit die Vertrauensbereiche nicht zu gering werden, sind die folgenden Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Die Standardabweichung darf nicht kleiner als 20 % des Mittelwertes werden.
- Werden Mittelwerte kleiner 50 Fahrzeuge pro 15 Minuten ermittelt, wird die Standardabweichung auf 10 Fz./15 min (entspricht 20% von 50 Fz.) gesetzt.

Keine Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Wenn neue Detektoren in das System integriert werden, ist eine Mindestanzahl von Tagesganglinien in die Berechnung der Standardabweichung mit einzubeziehen. Für die vorliegende Berechnung wurde eine Mindestanzahl von fünf Ganglinien gewählt. Die Standardabweichung berechnet sich zu:

$$S_{i;z} = \sqrt{\frac{n_i * \sum_{j=1}^{n_i} Z_i^2(j) - (\sum_{j=1}^{n_i} Z_i(j))^2}{n_i * (n_i - 1)}} \quad \text{Gleichung 3-13}$$

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	j	= Messreihe j	[-]
	$S_{i;z}$	= Standardabweichung im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	$Z_i(j)$	= Zählwert der Messreihe j im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	n_i	= Anzahl der Messwerte im Zeitintervall i	[-]

Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Nach Beendigung der „Trainingsphase“ wird im Datenmodell immer nur die Referenzganglinie mit den einzelnen Standardabweichungen abgelegt. Neue Ganglinien werden nach einer Korrelationsrechnung der Referenzganglinie hinzugefügt. Da der alte Datenbestand nicht mehr zur Verfügung steht, muss die Standardabweichung wie folgt berechnet werden (Näherung) [HERZ, 1992]:

$$S_{i,Z,neu} = \sqrt{\frac{S_{i,Z,alt}^2 * (n-2) + (Z_{i,neu} - \bar{Z}_{i,neu})^2}{n-1}}$$

Gleichung 3-14

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	$S_{i,Z,neu}$	= Neue Standardabweichung im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	$S_{i,Z,alt}$	= Alte Standardabweichung im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	$\bar{Z}_{i,neu}$	= Neuer mittlerer Zählwert im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	$Z_{i,neu}$	= Zählwert der neuen Messreihe im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	n	= Anzahl der Messwerte nach Aufnahme der neuen Ganglinie	[-]

Ganglinienaufnahme in Referenzbasis

Ziel des nachfolgend beschriebenen Verfahrens ist es, die bestehende Referenzdatenbasis mit aktuellen Ganglinien zu verbessern. Auf Grund der Vielzahl von Einflüssen auf das Verkehrsaufkommen, die zuvor beschrieben wurden (z.B. Veranstaltungen, Verkehrsbehinderungen, Ferien etc.), muss zunächst geprüft werden, ob eine eingehende aktuelle Tagesganglinie mit der Ganglinie der definierten Grundklasse oder Sonderklasse übereinstimmt.

Um allerdings zu überprüfen, ob eine aktuelle Ganglinie zur Referenzdatenbasis hinzugefügt werden darf (Verbesserung der Referenzdatenbasis), wurden in dieser Arbeit zwei unterschiedliche Verfahren auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft:

1. Korrelationstest
2. Chi-Quadrat-Anpassungstest

Korrelationstest

Unter einer Korrelation versteht man das Maß für den linearen Zusammenhang zwischen zwei betrachteten Zeitreihen. Der lineare Zusammenhang ist dadurch gekennzeichnet, dass beide Zeitreihen sich in gleichem Maß mit einer anderen Größe, z.B. mit der Zeit, ändern. Die Zusammenhangsmessung zwischen den Werten einer Zeitreihe erfolgt durch die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten. Der Korrelationskoeffizient gibt Auskunft darüber, ob die beiden Zeitreihen in einem statistischen Zusammenhang stehen ($R=1$, $R=-1$) oder unabhängig voneinander sind ($R=0$). Für die Berechnung der Korrelation sind die Standardabweichung und das arithmetische Mittel der Ganglinien zu berechnen.

Bei positivem Testergebnis wird eine neue Ganglinie der Referenzganglinien hinzugefügt. Auch hier wird zunächst geprüft, ob für mindestens 80 Zeitintervalle gültige Werte (also für mindestens 20 Stunden eines Tages) vorhanden sind. Wenn dieser Fall eintritt, dann wird die Korrelationsrechnung gestartet. Wenn nicht ausreichend Messwerte vorliegen, wird die Ganglinie nicht in die derzeit betrachtete Klasse aufgenommen. Zu einem späteren Zeitpunkt werden die verworfenen Ganglinien einer vertiefenden Betrachtung unterzogen, um neue Klassen zu definieren.

Bevor eine neue Ganglinie in die Referenzbasis hinzugefügt werden darf, ist zu prüfen, ob der Verlauf der Ganglinie ähnlich der Referenzganglinie ist. Beobachtungen haben ergeben, dass Ganglinien mit einem Korrelationskoeffizienten > 0.85 in die Referenzdatenbasis aufzunehmen sind. Ein Beispiel zeigt **Bild 3-16**.

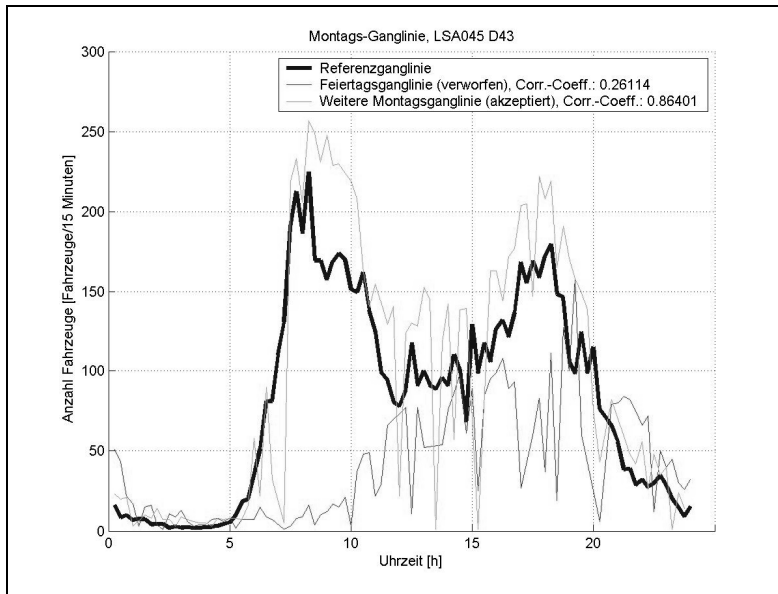


Bild 3-16: Gegenüberstellung einer Referenzganglinie (montags) mit zwei weiteren Ganglinien

Die dicke blaue Linie repräsentiert die Referenzganglinie eines Detektors an einem Montag. Die grüne Ganglinie wurde an einem weiteren Montag detektiert. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,86. Diese Ganglinie wird somit zur Referenzbasis hinzugefügt.

Die rote Ganglinie wurde am Ostermontag 2004 detektiert. Diese ist nicht zur Referenzbasis für einen Montag hinzuzufügen, da es sich nicht um einen typischen Verlauf handelt (Korrelationskoeffizient: 0,26).

Der Korrelationskoeffizient wird wie folgt berechnet:

$$\rho = \frac{\delta_{\text{Re,Akt}}}{S_{Z,\text{Re}} * S_{Z,\text{Akt}}} \quad \text{Gleichung 3-15}$$

Es gilt: $0 \leq \rho \leq 1$

- Standardabweichung für aktuelle Ganglinie:

$$S_{Z,\text{Akt}} = \sqrt{\frac{n_{\text{Akt}} * \sum_{i=1}^{n_{\text{Akt}}} Z_{\text{Akt}}^2(i) - \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{Akt}}} Z_{\text{Akt}}(i)\right)^2}{n_{\text{Akt}} * (n_{\text{Akt}} - 1)}} \quad \text{Gleichung 3-16}$$

- Standardabweichung für Referenzganglinie:

$$S_{Z,\text{Re}} = \sqrt{\frac{n_{\text{Re}} * \sum_{i=1}^{n_{\text{Re}}} Z_{\text{Re}}^2(i) - \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{Re}}} Z_{\text{Re}}(i)\right)^2}{n_{\text{Re}} * (n_{\text{Re}} - 1)}} \quad \text{Gleichung 3-17}$$

- Kovarianz der Referenzganglinie und aktueller Ganglinie:

$$\delta_{\text{Re,Akt}} = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (Z_{\text{Akt}}(i) - \bar{Z}_{\text{Akt}}) * (Z_{\text{Re}}(i) - \bar{Z}_{\text{Re}}) \quad \text{Gleichung 3-18}$$

Bedingung: $n = n_{\text{Akt}} = n_{\text{Re}}$

mit:	ρ	= Korrelationskoeffizient	[-]
	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 - 7:30 Uhr	[-]
	$\delta_{\text{Re,Akt}}$	= Kovarianz für Referenzganglinie und aktuelle Ganglinie	[-]
	$S_{Z,\text{Akt}}$	= Standardabweichung für aktuelle Ganglinie	[Kfz / 15 min]
	$S_{Z,\text{Re}}$	= Standardabweichung für Referenzganglinie	[Kfz / 15 min]
	$Z_{\text{Akt}}(i)$	= Zählwert der aktuellen Ganglinie im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	$Z_{\text{Re}}(i)$	= Zählwert der Referenzganglinie im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	\bar{Z}_{Akt}	= Mittlerer Zählwert der aktuellen Ganglinie	[Kfz / 15 min]
	\bar{Z}_{Re}	= Mittlerer Zählwert der Referenzganglinie	[Kfz / 15 min]
	n_{Akt}	= Anzahl der Zählwerte der aktuellen Ganglinie	[-]
	n_{Re}	= Anzahl der Zählwerte der Referenzganglinie	[-]

Chi-Quadrat-Anpassungstest

Alternativ zur Überprüfung einer aktuellen Tagesganglinie zur Aufnahme und Verbesserung einer Referenzganglinie ist es auch denkbar, einen Chi-Quadrat-Anpassungstest durchzuführen. Bei diesem Test wird ein Vergleich einer empirischen Verteilung (also einer aktuellen Tagesganglinie) mit einer erwarteten Verteilung (also der bisherigen Referenzganglinie) durchgeführt.

Folgende Berechnungsschritte für das Testverfahren sind durchzuführen:

1. *Definition der Hypothese H_0* : Die Verteilungen der Tagesganglinie und Referenzganglinie weichen nur zufällig voneinander ab.
2. *Prüfgröße X^2* :

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Z_{\text{Akt}}(i) - Z_{\text{Re}}(i))^2}{Z_{\text{Re}}(i)} \quad \text{Gleichung 3-19}$$

mit: X^2 = Prüfgröße des Chi-Quadrat-Anpassungstest [-]

$Z_{Re}(i)$ = Zählwert der Referenzganglinie im Zeitintervall i [Kfz / 15 min]

\bar{Z}_{Akt} = Mittlerer Zählwert der aktuellen Ganglinie [Kfz / 15 min]

\bar{Z}_{Re} = Mittlerer Zählwert der Referenzganglinie [Kfz / 15 min]

n = Anzahl der Zählwerte der Ganglinien [-]

3. Berechnung der Freiheitsgrade

Bei jedem Chi-Quadrat-Anpassungstest ist die Zahl der Freiheitsgrade zu bestimmen. Die Zahl der Freiheitsgrade hängt von der Zahl der Klassen und der Anzahl der Parameter, die geschätzt werden müssen, ab. Sie errechnen sich zu

$$f = (k-1) * (n-1).$$

In dem hier betrachteten Beispiel ist $k=2$ (Anzahl der betrachteten Zeitreihen; Referenzganglinie und Tagesganglinie) und $n=96$ (Anzahl der Zählwerte in der jeweiligen Ganglinie). Der Freiheitsgrad f errechnet sich zu 95.

4. Durchführung des Tests

Unter Verwendung der Prüfgröße X^2 und dem Freiheitsgrad f kann der Funktionswert der Chi-Quadrat-Verteilung errechnet oder aus Tabellen abgelesen werden (vgl. [BRONSTEIN, 2003]). Bei einem Freiheitsgrad $f=95$ ergeben sich die folgenden Prüfgrößen:

Eintrittswahrscheinlichkeit	Prüfgröße X^2 bei Freiheitsgrad $f=95$
95 %	< 73,5
90 %	< 77,8
85 %	< 80,8
80 %	< 83,0
70 %	< 87,8
60 %	< 90,9

Tabelle 3-7: Prüfgrößen für Chi-Quadrat-Anpassungstest

Um einen statistischen Zusammenhang zwischen einer aktuellen Tagesganglinie und einer Referenzganglinie nachweisen zu können, muss die berechnete Prüfgröße X^2 kleiner dem Vergleichswert gemäß **Tabelle 3-7** bei einer gewählten Eintrittswahrscheinlichkeit sein (z.B. 95%) sein. Ist der Test positiv verlaufen, kann die aktuelle Tagesganglinie in die Referenz aufgenommen werden.

Vergleich der Verfahren zur Bildung von Referenzganglinien

Die zuvor beschriebenen Verfahren zur Überprüfung der Aufnahme einer aktuellen Tagesganglinie in eine Referenzganglinie mit der Berechnung eines Korrelationskoeffizienten oder durch die Anwendung des Chi-Quadrat-Anpassungstests liefern unterschiedliche Ergebnisse. Anhand zweier Beispiele soll eine Empfehlung für die Anwendung eines Verfahrens gegeben werden.

Bild 3-17 zeigt eine Freitags-Referenzganglinie der Detektoren eines Knotenpunkts in Darmstadt. Dem gegenübergestellt ist eine Tagesganglinie vom 14.1.2005. Bei einem visuellen Vergleich der Ganglinien wird deutlich, dass die beiden Ganglinien vom Verlauf her ähnlich sind. Am 14.1.2005 wurde allerdings ein deutlich höheres Verkehrsaufkommen detektiert, als bei der Freitags-Referenzganglinie ermittelt. Diese plausiblen Messungen sollten auch bei der Referenzbildung berücksichtigt werden.

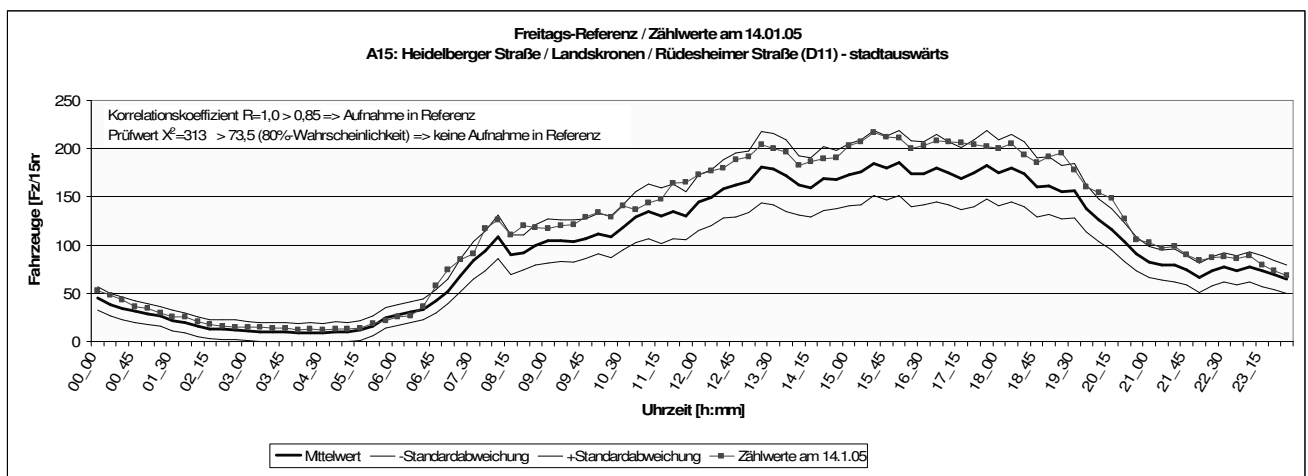


Bild 3-17: Gegenüberstellung einer Referenzganglinie (Freitags) mit einer Freitags-Ganglinie (14.01.05) sowie der Testergebnisse zur Referenzbildung

Korrelationsrechnung: Aufnahme in Referenz

Chi-Quadrat-Anpassungstest: keine Aufnahme in Referenz

Die Überprüfung der Ganglinienaufnahme in die Referenz kommt nach dem Verfahren mit Korrelationsrechnung zu einem positiven Ergebnis ($R=1$). Der Chi-Quadrat-Anpassungstest hat bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 80% einen Prüfwert von 83 (vgl. **Tabelle 3-7**). Die errechnete Prüfgröße X^2 aus dem Ganglinienvergleich beträgt 313, so dass kein statistischer Zusammenhang nachgewiesen werden kann. Der Grund liegt in den relativ großen Differenzen zwischen den Zählwerten der Tagesganglinie und der Referenzganglinie in den einzelnen Zeitintervallen.

In einem weiteren Beispiel wurde ermittelt, wie groß Abweichungen einer zu testenden Ganglinie von der Referenzganglinie maximal sein dürfen, damit der X^2 -Anpassungstest ein positives Ergebnis liefert. Dazu wurden Messwerte der Referenzganglinie um einen prozentualen Anteil so lange verändert, bis die errechnete Prüfgröße X^2 kleiner dem Prüfwert bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 80% ist. Die Berechnungen sind in **Bild 3-18** zusammengefasst.

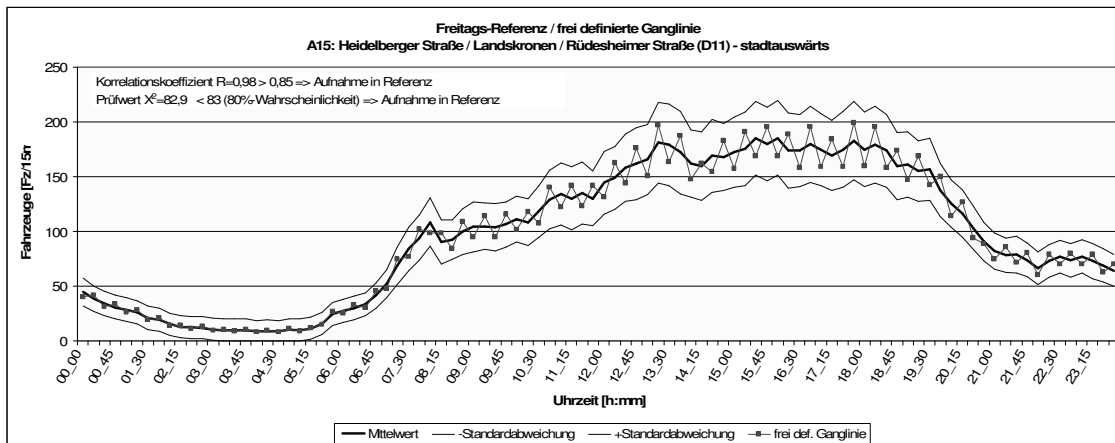


Bild 3-18: Gegenüberstellung einer Referenzganglinie (Freitags) mit einer frei definierten Freitags-Ganglinie (Abweichung ca. 9,5% jedes Zählwertes von Referenz) sowie der Testergebnisse zur Referenzbildung
Korrelationsrechnung: Aufnahme in Referenz
Chi-Quadrat-Anpassungstest: Aufnahme in Referenz

Bei einer mittleren Abweichung der Zählwerte kleiner 9,5% von der Referenzganglinie wird ein statistischer Zusammenhang (Eintrittswahrscheinlichkeit 80%) festgestellt. Werden höhere Eintrittswahrscheinlichkeiten verlangt, reduziert sich die prozentuale Abweichung (bei 95% Eintrittswahrscheinlichkeit, 9% Abweichung). Der Korrelationstest liefert mit einem Koeffizienten $R=0,98$ ebenfalls ein positives Ergebnis.

Weitere Überlegungen haben es sinnvoll erscheinen lassen, dass der Chi-Quadrat-Anpassungstest mit normierten Ganglinien durchzuführen ist. Bei einer Gangliniennormierung werden alle Einzelmesswerte durch den Mittelwert über alle Messwerte der Tagesganglinie dividiert. Mit den so normierten Tagesganglinien und Referenzganglinien wurde erneut der Chi-Quadrat-Anpassungstest durchgeführt. Ein Beispiel einer normierten Referenzganglinie und Tagesganglinie zeigt **Bild 3-19**:

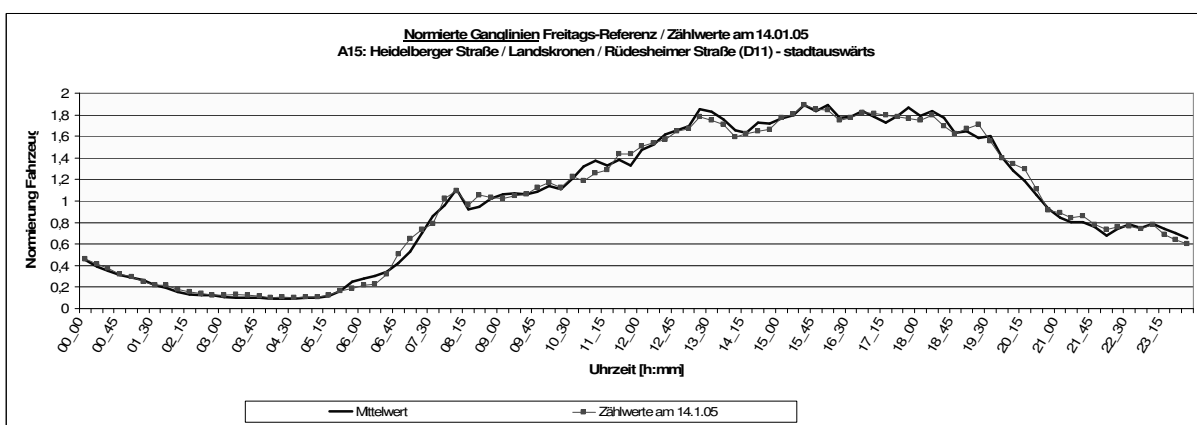


Bild 3-19: Gegenüberstellung einer normierten Referenzganglinie (Freitags) mit einer normierten Freitags-Ganglinie (14.01.05)

Das Ergebnis des Tests hat ergeben, dass die Prüfgröße X^2 einen Wert von 0,29 annimmt und somit auch dieses Tagesganglinie in die Referenz aufzunehmen ist.

Die Beispiele zeigen, dass durch den Chi-Quadrat-Anpassungstest nicht normierte Ganglinien nicht zur Referenzbildung herangezogen werden, wenn höhere oder niedrigere Abweichungen der Messwerte festgestellt werden, obwohl der Ganglinienverlauf insgesamt relativ ähnlich ist (vgl. **Bild 3-17**). Es wird daher empfohlen, bei einer Verwendung des Chi-Quadrat-Anpassungstest zunächst eine Normierung der jeweiligen Ganglinien durchzuführen. Bislang wurde allerdings noch kein umfassender Vergleich zwischen den beiden Testverfahren durchgeführt um die jeweiligen Wirkungen in der Berechnung der Referenzganglinien zu bewerten.

Für die weiteren Arbeiten wurde die Korrelationsberechnung zur Referenzbildung der Ganglinien genutzt. Das Verfahren kann bei exakt gegenläufigen Tagesganglinien gegenüber der Referenzganglinie durchaus einen statistischen Zusammenhang liefern, so dass eine gegenläufige Tagesganglinie dann in die Referenzdatenbasis aufgenommen würde. Bei Überprüfungen der Berechnungen von Referenzganglinien in Darmstadt sind solche fehlerhaften Berechnungsschritte allerdings nicht aufgetreten. Es ist auch nahe liegend, dass das tägliche Verkehrsaufkommen eine ähnliche Ausprägung hat (ausgeprägte Morgen- und Nachmittagsspitzen, wenig Verkehr in der Nacht), so dass das Verfahren korrekte Ergebnisse liefern wird.

Automatisierte Ermittlung neuer Ganglinienklassen

Durch die Anwendung der Verfahren zur Bildung und Verbesserung von Referenzganglinien können vereinzelt Tagesganglinien ohne eine Zuordnung zu einer definierten Ereignisklasse (Grundklasse und Sonderklasse) im Datenmodell verbleiben. Diese zunächst als nicht repräsentativ gekennzeichneten Ganglinien beschreiben allerdings bestimmte Situationen im Motorisierten Individualverkehr, deren Erkennung zur Einleitung verkehrslenkender Maßnahmen von Bedeutung sein können. Daher wird empfohlen, das bisherige Verfahren der Referenzganglinienbildung dahingehend zu erweitern, dass neue typische Klassen aus den bislang nicht verarbeiteten Tagesganglinien abgeleitet werden. Es setzt eine detaillierte Untersuchung der Umstände (z.B. Unfall), des detektierten Verkehrsaufkommens voraus. Dieses Verfahren wurde bislang nicht umgesetzt.

Mobil erhobene Daten

Für die jeweiligen Elemente der Straßendatenbank ist sukzessive eine Datenbasis aufzubauen, in der die mittleren momentanen Geschwindigkeiten für einzelne Zeitintervalle hinterlegt werden. Für jeden eingehenden Geschwindigkeitsmesswert eines FTD-Teilnehmers wird untersucht, ob der Stützwert der Tagesganglinie zu diesem Zeitpunkt innerhalb des Vertrauensintervalls der Standardabweichung der Referenzganglinie liegt. Ist dies der Fall, kann der Messwert zur Generierung der Referenz-Geschwindigkeitsprofile herangezogen werden.

Auf Grund der nicht sehr großen Verbreitung der Erfassungsgeräte muss das zu entwickelnde Verfahren zur Ermittlung von Geschwindigkeitganglinien daher berücksichtigen, dass zeitliche Erfassungslücken in den jeweiligen Ganglinien entstehen können.

Sobald für jedes 15 Minuten-Intervall eine Mindestanzahl als gültig erkannter Werte vorhanden ist, ist eine erste Berechnung eines Referenzwertes (Mittelwert) und seiner Standardabweichung durchzuführen. Es wurde eine Mindestanzahl von 5 Messwerten für die Berechnungen in der Testphase vorausgesetzt. Bei geringen Ausstattungsgraden kann die Bildung der Referenzdatenbasis eine längere Zeit in Anspruch nehmen, bis flächendeckend Messwerte vorliegen. Der Ausstattungsgrad von Fahrzeugen mit einer mobilen Erfassungseinheit wurde am Beispiel der Region Frankfurt RheinMain in **Kapitel 5.4.1** abgeschätzt.

Die Berechnung von Referenzganglinien wird in zwei Phasen unterteilt:

Keine Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Dies ist in der Regel immer dann der Fall, wenn ein Streckenabschnitt erstmalig mit einem mobilen Endgerät befahren wird. In einer ersten „Trainingsphase“ sind zunächst eine Mindestanzahl (in der Testphase 5 gewählt) von Einzelwerten der Geschwindigkeiten für jedes Zeitintervall und Streckenabschnitt zur Bildung einer Referenz heranzuziehen.

Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Da im FTD-Prozess erst nach einer längeren Trainingsphase für jedes Zeitintervall Referenzwerte vorliegen werden (geringe Verbreitung von mobilen Endgeräten in der Anfangsphase), sind nur Einzelreferenzwerte pro Zeitintervall ggf. um neue Messwerte zu ergänzen. Nach Prüfung der positiven und negativen Standardabweichung um den Mittelwert der Referenz wird entschieden, ob ein aktuell detektierter Wert in die Referenzdatenbasis aufgenommen werden darf. Eine Korrelationsrechnung wie bei der Generierung der Detektor-Tagesganglinien ist nicht anwendbar, da unvollständige Datenreihen in der Referenz bzw. in den einzelnen Tagesganglinien falsche Ergebnisse liefern würden.

Mittelwertbildung

Keine Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Bei einer erstmaligen Befahrung von Streckenabschnitten ist eine Referenzdatenbasis für verschiedene Klassen (z.B. Mo, Di, Mi, Do, Fr, Sa, So) für jedes Zeitintervall zu ermitteln, bevor eine gesicherte Aussage zur mittleren momentanen Geschwindigkeit im betrachteten Abschnitt und Zeitintervall gegeben werden kann.

Zunächst sind Zeitintervalle festzulegen, denen die eingehenden Geschwindigkeitswerte zugeordnet werden. Die Länge eines Zeitintervalls sollte maximal 15 Minuten betragen. Da der Strichprobenumfang in der Erprobungsphase sehr gering ist und Detektorwerte im Straßennetz ebenfalls in 15-Minuten-Intervallen aktualisiert werden, ist dieser Wert in einem Probetrieb anzusetzen.

Für jedes Zeitintervall eines Streckenabschnitts sollten mindestens fünf Einzelwerte verwendet werden, um einen Mittelwert zu berechnen.

Die Mittelwertbildung wird dann für jedes Zeitintervall durchgeführt nach:

$$\bar{v}_i = \frac{\sum_{j=1}^n v_i(j)}{n_i} \quad \text{Gleichung 3-20}$$

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	j	= Messreihe j	[-]
	\bar{v}_i	= Mittlerer Geschwindigkeit im Zeitintervall i	[km/h]
	$v_i(j)$	= Geschwindigkeit der Messreihe j im Zeitintervall i	[km/h]
	n_i	= Anzahl der Messwerte im Zeitintervall i; i.d.R. n=5	[-]

Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Nach Ende der „Trainingsphase“ wird im Datenmodell immer nur der Referenzwert für jedes Zeitintervall abgelegt. Neue Einzelwerte werden erst nach Überprüfung des Vertrauensintervalls zwischen positiver und negativer Standardabweichung um den Mittelwert in der Datenbasis aufgenommen.

Es gilt:

$$\bar{v}_i - S_{v,i} \leq v_i(j) \leq \bar{v}_i + S_{v,i} \quad \text{Gleichung 3-21}$$

mit:

	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	$S_{v,i}$	= Standardabweichung im Zeitintervall i	[km/h]
	\bar{v}_i	= Mittlerer Zählwert im Zeitintervall i	[km/h]
	$v_i(j)$	= Zählwert der Messreihe j im Zeitintervall i	[km/h]

Da der vollständige historische Datenbestand nicht mehr zur Verfügung steht, muss der Mittelwert wie folgt berechnet werden:

$$\bar{v}_{i,neu} = \frac{\bar{v}_{i,alt} * n_{i,alt} + v_i(j)}{n_{i,neu}} \quad \text{Gleichung 3-22}$$

$$n_{i,neu} = n_{i,alt} + 1 \quad \text{Gleichung 3-23}$$

mit:

	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	j	= Messreihe	[-]
	$\bar{v}_{i,neu}$	= Neue mittlere Geschwindigkeit im Zeitintervall i	[km/h]
	$\bar{v}_{i,alt}$	= Alter mittlere Geschwindigkeit im Zeitintervall i	[km/h]
	$v_i(j)$	= Geschwindigkeit j im Zeitintervall i	[km/h]
	$n_{i,alt}$	= Anzahl der Messwerte in bisheriger Referenzganglinie	[-]
	$n_{i,neu}$	= Anzahl der Messwerte nach Aufnahme des neuen Messwertes im Zeitintervall i	[-]

Standardabweichung

Neben der Mittelwertbildung für jedes Zeitintervall ist die Berechnung der Standardabweichung erforderlich. Die Standardabweichung ist das Maß der Streuung einzelner Messwerte um einen Mittelwert. Auch hierbei wird unterschieden, ob Geschwindigkeitsmesswerte neu in das System integriert werden sollen („Trainingsphase“) oder ob Referenzwerte bereits berechnet wurden.

Keine Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Wenn keine Geschwindigkeitswerte für einzelne Zeitintervalle im System hinterlegt sind, sind mindestens fünf Einzelwerte eines Zeitintervalls in die Berechnung der Standardabweichung mit einzubeziehen:

$$S_{v,i} = \sqrt{\frac{n_i * \sum_{j=1}^{n_i} v_i^2(j) - (\sum_{j=1}^{n_i} v_i(j))^2}{n_i * (n_i - 1)}} \quad \text{Gleichung 3-24}$$

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	j	= Messreihe j	[-]
	$S_{v,i}$	= Standardabweichung im Zeitintervall i	[km/h]
	$v_i(j)$	= Geschwindigkeit der Messreihe j im Zeitintervall i	[km/h]
	n_i	= Anzahl der Messwerte im Zeitintervall i, i.d.R. n=5	[-]

Referenzganglinie der Tagesklasse vorhanden

Nach Beendigung der „Trainingsphase“ wird im Datenmodell immer nur die Referenzganglinie mit den einzelnen Standardabweichungen abgelegt. Da der alte Datenbestand nicht mehr zur Verfügung steht, muss die Standardabweichung wie folgt berechnet werden (Näherung):

$$S_{v,i,neu} = \sqrt{\frac{S_{v,i,alt}^2 * (n - 2) + (Z_{i,neu} - \bar{Z}_{i,neu})^2}{n - 1}} \quad \text{Gleichung 3-25}$$

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	$S_{v,i,neu}$	= Neue Standardabweichung im Zeitintervall i	[km/h]
	$S_{v,i,alt}$	= Alte Standardabweichung im Zeitintervall i	[km/h]
	$\bar{Z}_{i,neu}$	= Neuer mittlerer Zählwert im Zeitintervall i	[km/h]
	$Z_{i,neu}$	= Zählwert der neuen Messreihe im Zeitintervall i	[km/h]
	n	= Anzahl der Messwerte nach Aufnahme des neuen Zählwertes	[-]

3.6.4 Datenfusion

Stationäre Daten

An vielen signalgeregelten Knotenpunkten befinden sich in den jeweiligen Zufahrten mehrere Detektoren. Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren sieht eine gemeinsame Betrachtung von Detektoren innerhalb eines Straßenquerschnitts vor. Ein Beispiel eines Knotenpunkts mit der Lage der Detektoren zeigt **Bild 3-20**.

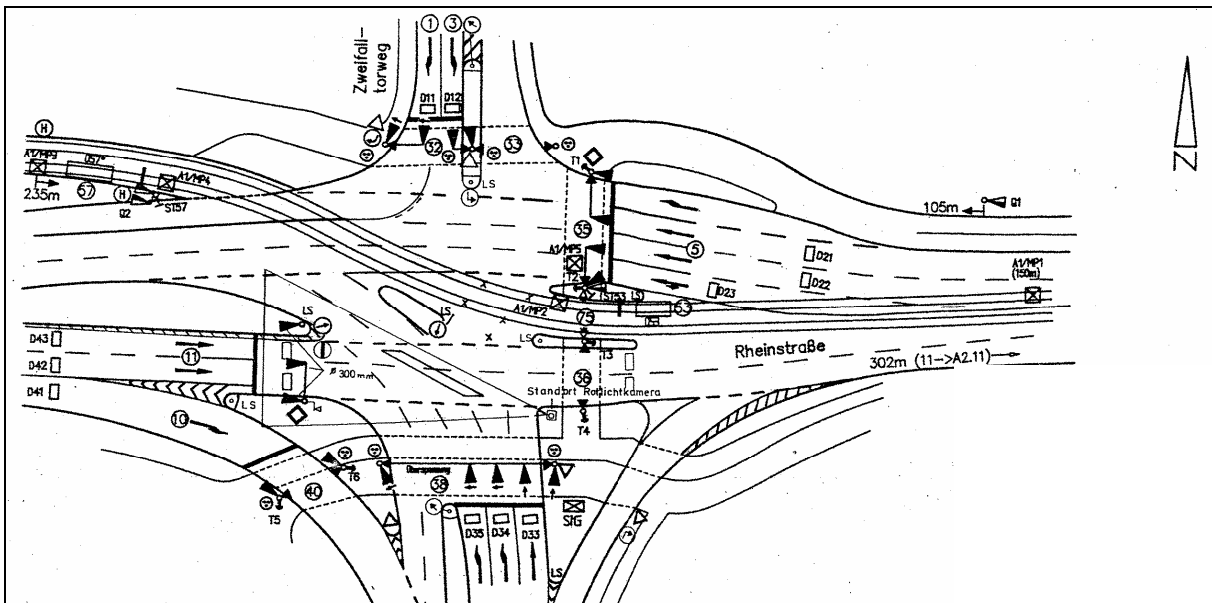


Bild 3-20: Knotenpunkt in Darmstadt mit Lage der Detektoren
(KP Rheinstraße / Am Kavalleriesand)
[QUELLE: Straßenverkehrsamt Stadt Darmstadt]

In den einzelnen Zufahrten ist die Lage der Detektoren erkennbar. Es wird deutlich, dass am Knotenpunkt im Beispiel **Bild 3-20** sich in der westlichen Zufahrt insgesamt drei Detektoren (D41, D42, D43) befinden. Um eine Aussage zum Gesamtverkehrsaufkommen in der westlichen Zufahrt treffen zu können, sind die verkehrlichen Kennwerte zusammenzufassen.

Die nach den Verfahren in **Abschnitt 3.6.3** gebildeten Referenzganglinien einzelner Detektoren sind entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu einem Querschnitt zusammenzufassen.

Ein Beispiel einer über die Detektoren D41, D42 und D43 zusammengefassten Ganglinie (Mittelwert und Standardabweichung) zeigt **Bild 3-21**.

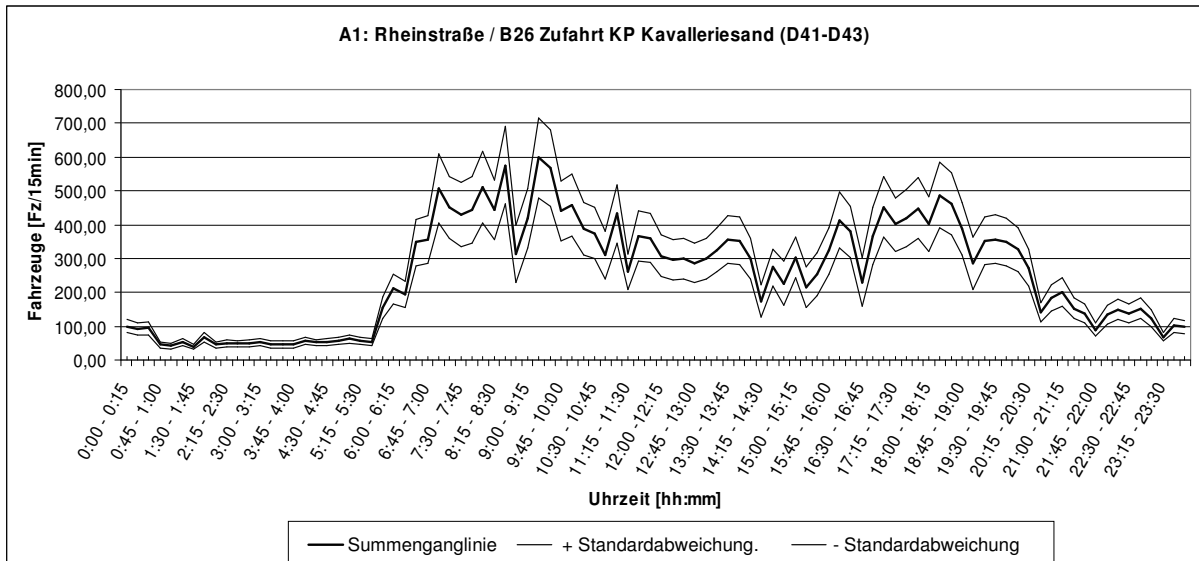


Bild 3-21: Über mehrere Detektoren eines Querschnitts zusammengefasste Tagesganglinie der Verkehrsbelastungen [Fahrzeuge pro 15 Minuten]

Da die Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Detektoren bereits vorliegen, können die Kennwerte der Gesamtverteilung aller Werte aus den Parametern der Einzelverteilungen berechnet werden. Der Vorteil dabei ist, dass nicht auf das ursprüngliche Datengerüst zurückgegriffen werden muss, was eine deutliche Zeitersparnis durch verringerten Datenzugriff ermöglicht.

Summenbildung

Die Summenbildung der Zählwerte wird für jedes Zeitintervall durchgeführt nach:

$$Z_{Sum,i} = \sum_{j=1}^{n_{Det}} Z_i(j)$$

Gleichung 3-26

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	j	= Referenzganglinie für Detektor j	[-]
	$Z_{Sum,i}$	= Summe der Zählwert im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	$Z_i(j)$	= Zählwert der Messreihe j im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	n_{Det}	= Anzahl der Detektoren, die zusammengefasst werden sollen	[-]

Standardabweichung

Neben der Mittelwertbildung für jedes Zeitintervall ist eine Berechnung der Standardabweichung erforderlich. Dabei werden die Einzelstreuungen der Ganglinien jedes Detektors berücksichtigt.

$$S_{Z,i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_{Det}} [S_{Z,i}^2(j) * (n_i(j) - 1) + (Z_i(j) - \bar{Z}_i)^2 * n_i(j)]}{\left(\sum_{j=1}^k n_i(j)\right) - 1}} \quad \text{Gleichung 3-27}$$

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	j	= Messreihe j	[-]
	n_{Det}	= Anzahl der Detektoren, die zusammengefasst werden sollen	[-]
	$S_{Z,i}(j)$	= Standardabweichung im Zeitintervall i der Messreihe j	[Kfz / 15 min]
	$n_i(j)$	= Anzahl der Messwerte im Zeitintervall i der Messreihe j, die zum Referenzwert der Ganglinie geführt haben (z.B. wurden zur Bildung der Referenzganglinie für einen Detektor 6 Einzelganglinien genutzt).	[-]
	$Z_i(j)$	= Zählwert der Messreihe j im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	\bar{Z}_i	= Mittelwert im Zeitintervall i aus Zählwerten der Einzelganglinien nach:	
		$\bar{Z}_i = \frac{Z_{Sum,i}}{k}$	[Kfz / 15 min]

Vergleich Online erhobener Zählwerte mit Referenzbasis

Die Bildung der Referenzdatenbasis dient dazu, fortdauernd Messwerte, die im Onlinebetrieb an die Zentrale übertragen werden, zu überprüfen. Sind signifikante Abweichungen des Online-Messwertes zur Referenzbasis erkennbar, ist dies ein Anzeichen für eine Störung im Streckenabschnitt, in dem sich die Detektoren befinden.

Der Vergleich von Online-Werten mit der Referenzdatenbasis wird immer für einen Streckenabschnitt im Zulauf einer Knotenpunktzufahrt durchgeführt, nicht für einzelne Detektoren!

Jeder Referenzwert in einem Zeitintervall i hat eine unterschiedliche Standardabweichung. Bei einer sehr geringen Standardabweichung ist davon auszugehen, dass die Genauigkeit des Mittelwertes der Referenzganglinie recht groß ist. Bei einer großen Standardabweichung dagegen ist die Referenzganglinie mit einer größeren Ungenauigkeit behaftet. In dem zu implementierenden Verfahren wird ein Toleranzbereich definiert, in dem die Online erhobenen Messwerte schwanken dürfen, ohne dass daraus unmittelbar eine Störung abgeleitet wird. Die Überprüfung der Online erhobenen Messwerte mit der Referenzbasis ist wie folgt zu beschreiben:

$$\bar{Z}_i - S_{Z,i} \leq Z_{i,neu} \leq \bar{Z}_i + S_{Z,i} \quad \text{Gleichung 3-28}$$

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	$S_{Z,i}$	= Standardabweichung im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	\bar{Z}_i	= Mittlerer Zählwert im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]
	$Z_{i,neu}$	= Zählwert der neuen Messreihe im Zeitintervall i	[Kfz / 15 min]

Positivfall - Messwert liegt innerhalb der Toleranzgrenze:

→ Keine Abweichung vom normalen Verlauf detektiert.

Negativfall - Messwert liegt außerhalb der Toleranzgrenze:

→ Eine Abweichung vom normalen Verlauf wurde detektiert (z.B. Störfall oder Messwerteausfall).

Mobil erhobene Daten

Erfassungsgüte (FTD-Bewertungskennwert)

Die zentralenseitig berechneten Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer können Schwankungen unterliegen, da jeder Verkehrsteilnehmer bei freiem Verkehr die Geschwindigkeit frei wählt (unter Berücksichtigung der zulässigen Geschwindigkeit). Daneben ist jeder erhobene Messwert zunächst zu hinterfragen, da nicht ermittelt werden kann, ob der Verkehrsteilnehmer bewusst eine geringe Geschwindigkeit gewählt hat. Werden Streckenabschnitte von mehr als einem Fahrzeug mit mobilen Erfassungseinrichtungen befahren, ist für den jeweiligen Streckenabschnitt eine mittlere Geschwindigkeit und die zugehörige Standardabweichung zu berechnen. Die errechneten mittleren Geschwindigkeiten eines Streckenabschnitts aus Einzelmessungen sind mit einem Vertrauenswert zu hinterlegen. Es wird daher ein so genannter FTD-Bewertungskennwert eingeführt, in den zur Bewertung die folgenden Kriterien einfließen:

- Anzahl der erhobenen Geschwindigkeiten unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer in einem Streckenabschnitt.
- Standardabweichung der berechneten Geschwindigkeiten.

Die sich daraus ergebende Definition des Bewertungskennwertes ist in **Tabelle 3-8** dargestellt. Ein FTD-Bewertungskennwert von 1 bedeutet, dass die eingehenden Ergebnisse plausibel sind. Ein Kennwert von 3 kennzeichnet Messwerte, deren Plausibilität ungeklärt ist.

Anzahl der erhobenen Geschwindigkeiten unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer in einem Streckenabschnitt	Standardabweichung [km/h]	Beschreibung	FTD-Bewertungs-Kennwert
1	-	Da nur ein Fahrzeug im Streckenabschnitt gefahren ist, wird diesem Einzelwert ein geringes Vertrauen geschenkt.	3
> 1	$0,8 * \bar{v}_i \leq S_i \leq \bar{v}_i$	Es wurden mehrere Fahrzeuge in einem Streckenabschnitt erfasst. Die Geschwindigkeiten variieren allerdings <u>sehr stark</u> .	3
> 1	$0,5 * \bar{v}_i \leq S_i \leq 0,8 * \bar{v}_i$	Es wurden mehrere Fahrzeuge in einem Streckenabschnitt erfasst. Die Geschwindigkeiten variieren <u>stark</u> .	2
> 1	$0,1 * \bar{v}_i \leq S_i \leq 0,5 * \bar{v}_i$	Es wurden mehrere Fahrzeuge in einem Streckenabschnitt erfasst. Die Geschwindigkeiten variieren in einem zulässigen Bereich.	1

Tabelle 3-8: Vertrauenswerte mittlerer Geschwindigkeiten generiert durch FTDBeurteilung der Verkehrslage im Online-Betrieb

Die Bildung der Referenzdatenbasis für Detektoren und für Geschwindigkeiten auf einzelnen Streckenabschnitten dient dazu, fortdauernd Messwerte, die im Onlinebetrieb an die Zentrale übertragen werden, zu überprüfen. Sind signifikante Abweichungen des Online-Messwertes zur Referenzbasis erkennbar, ist dies ein Anzeichen für eine Störung im Streckenabschnitt, in dem sich das Fahrzeug befindet.

Jeder Referenzwert in einem Zeitintervall i hat eine unterschiedliche Standardabweichung. Bei einer sehr geringen Standardabweichung ist davon auszugehen, dass die Genauigkeit des Mittelwertes der Referenzganglinie groß ist. Bei einer großen Standardabweichung dagegen ist die Referenzganglinie mit einer größeren Ungenauigkeit behaftet. In dem zu implementierenden Verfahren wird ein Toleranzbereich definiert, in dem die Online erhobenen Messwerte schwanken dürfen, ohne dass daraus unmittelbar eine Störung abgeleitet wird.

Folgende Forderung ist zu überprüfen:

$$\bar{v}_i - S_i \leq v_i(j) \leq \bar{v}_i + S_i \quad \text{Gleichung 3-29}$$

mit:	i	= Zeitintervall: z.B. 7:15 -7:30 Uhr	[-]
	S_i	= Standardabweichung im Zeitintervall i	[km/h]
	\bar{v}_i	= Mittlere Geschwindigkeit im Zeitintervall i	[km/h]
	$v_i(j)$	= Geschwindigkeit der Messreihe j im Zeitintervall i	[km/h]

Positivfall - Messwert liegt innerhalb der Toleranzgrenze:

Keine Abweichung vom normalen Verlauf detektiert.

Negativfall - Messwert liegt außerhalb der Toleranzgrenze:

Dem Einzelmesswert ist ein geringes Vertrauen zu schenken.
Die Geschwindigkeit ist durch eine Fusion mit stationär erhobenen Daten einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen.

Fusion stationär und mobil erhobener Daten

Die mobil erhobenen Daten werden grundsätzlich auf ihre Plausibilität hin überprüft da zunächst nicht bekannt ist, ob die eingehenden Geschwindigkeiten auf einzelnen Streckenabschnitten, basierend auf einer geringen Stichprobe, die reale Verkehrslage repräsentieren. Befinden sich auf Streckenabschnitten zusätzlich Detektoren, können diese Daten sehr nützliche Informationen über mögliche Veränderungen der Verkehrslage liefern. Zur Rekonstruktion der aktuellen Verkehrslage im Straßennetz werden die stationären und mobil gewonnenen Daten in einer Verkehrszentrale zusammengeführt und dort durch Datenfusion einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Voraussetzung für eine effiziente Anbindung aller Datenquellen ist ein Datenverbund der die spezifischen Aspekte der einzelnen Systeme berücksichtigt. Bei einer Datenfusion ist zu beachten, dass die Daten mit unterschiedlicher, ggf. permanent schwankender Qualität vorliegen, also mit entsprechenden Vertrauensbereichen in die Fusion eingehen müssen. Eine Fusion kann dynamische Daten von stationären Detektoren (z.B. Verkehrsstärke) und dynamische Streckendaten aus Floating-Car-Data beinhalten. Aus diesen Informationen werden aktuelle Verkehrslagebilder abgeleitet. Noch findet die Integration der unterschiedlichen Informationsquellen auf verschiedenen Stufen statt. Einen Überblick über einige Verfahren der Datenfusion gibt das Merkblatt der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV zur Datenvervollständigung [FGSV, 2003].

Der in der vorliegenden Arbeit entwickelte Ansatz geht davon aus, dass Online detektierte Verkehrsmengen mit den momentanen Geschwindigkeiten im zugehörigen Streckenabschnitt eng miteinander in Verbindung stehen. Ein Beispiel hierfür zeigt **Bild 3-22**:

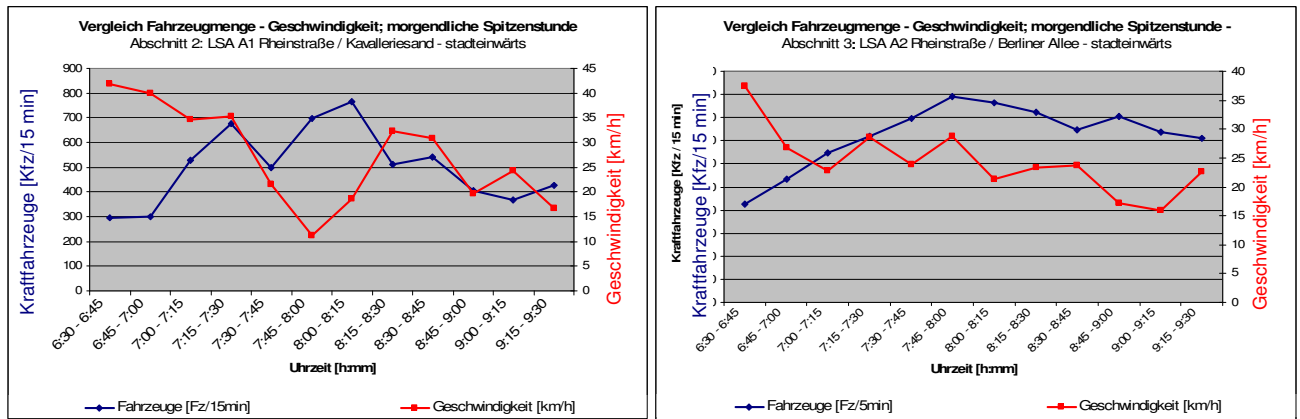


Bild 3-22: Vergleich von Verkehrsmengen und Geschwindigkeiten zweier Streckenabschnitte in Darmstadt in der morgendlichen Spitzenstunde

Bei steigendem Verkehrsaufkommen sinkt die Geschwindigkeit ab. In innerstädtischen Verkehrsnetzen hängt die abfließende Verkehrsmenge aus einem Streckabschnitt allerdings maßgeblich von den Freigabezeiten an Lichtsignalanlagen ab. Bei verkehrsabhängig geschalteten Anlagen können die Freigabezeiten variieren. Es kann durch ein anwachsendes Verkehrsaufkommen in einer benachbarten Knotenpunktzufahrt dazu kommen, dass die Freigabezeit der betrachteten Zufahrt verringert wird, so dass bei gleich bleibendem Zufluss der Abfluss abnimmt und sich dadurch auch die Geschwindigkeiten in dem vor der Lichtsignalanlage betrachteten Streckenabschnitt reduzieren. Um eine Aussage über den Zusammenhang zwischen abfließendem Verkehr und mittlerer Geschwindigkeit eines Streckenabschnitts treffen zu können, müssten die Freigabezeiten einzelner Knotenpunktzufahrten mit in die Betrachtung einfließen. Für das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Verfahren wurden Freigabezeiten der jeweiligen Lichtsignalanlagen nicht mit einbezogen, da diese nicht an den Verkehrsrechner in Darmstadt übermittelt werden. Gleichzeitig sollte ein allgemeingültiges Verfahren definiert werden, das auch auf Autobahnen anwendbar ist. Es ist davon auszugehen, dass das Verkehrsaufkommen einzelner LSA-Zufahrten eine regelmäßige Verteilung annimmt, die in einzelnen Klassen (z.B. Mo, Di, ...) als Referenzganglinien zu hinterlegen sind (vgl. **Kapitel 3.6.3**). Auch die Freigabezeiten werden somit zu den einzelnen Tageszeiten ähnliche Werte annehmen, wodurch der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsaufkommen zulässig ist.

Im Online-Betrieb ist zu prüfen, ob die in der Zentrale eingehenden mobil erhobenen Geschwindigkeitswerte innerhalb des Streuungsbereichs zwischen Mittelwert \pm Standardabweichung für das entsprechende Zeitintervall liegen. Ist dies der Fall, wird diese Geschwindigkeit als plausibel angesehen. Liegt der Wert außerhalb des Streuungsbereichs, ist ein Vergleich mit Detektoren im Straßennetz durchzuführen. Auch hierfür existieren verschiedene Referenzganglinien mit durchschnittlichen Werten der Verkehrsbelastungen für einzelne Zeitintervalle (i.d.R. 15.-Minuten-Intervalle).

Ein Beispiel dieser Vorgehensweise zeigt **Bild 3-23**. Darin sind Zählwerte eines Detektors einer Lichtsignalanlage gegenübergestellt mit ermittelten Geschwindigkeiten eines mobilen Endgeräts im zugehörigen Streckenabschnitt im Zulauf der LSA.

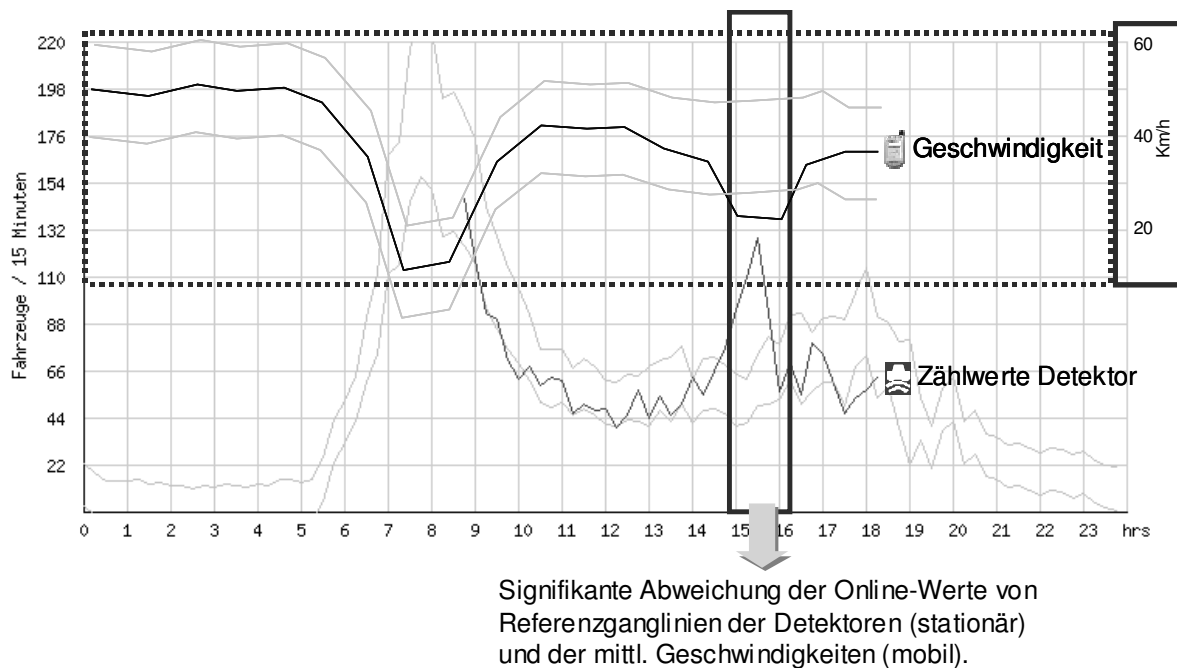


Bild 3-23: Beispiel einer Gegenüberstellung von Online-Messwerten FTD / Detektoren LSA bei einer Verkehrsstörung in der Zeit von 15 bis 16 Uhr

In der Zeit zwischen 16 bis 17 Uhr kommt es zu einem Absinken der Geschwindigkeit in dem betrachteten Streckenabschnitt. In diesem Zeitintervall ist eine deutliche Abweichung von der Geschwindigkeitsreferenzganglinie festzustellen. Wenn diese Geschwindigkeitsveränderung von lediglich einem mobilen Endgerät ermittelt wird, ist eine Plausibilitätsprüfung dieses Einzelereignisses vorzunehmen. Hierzu findet ein Vergleich mit Zählwerten von Detektoren im Straßennetz in dem zugehörigen Streckenabschnitt statt. Wie das Beispiel in **Bild 3-23** verdeutlicht, passieren in dem betrachteten Zeitabschnitt zwischen 16 und 17 Uhr deutlich mehr Fahrzeuge (~130 Fz/15 min) den Streckenabschnitt, als dies normalerweise üblich ist (~55 Fz/15 min). Die detektierten Verkehrsmengen sind außerhalb des Referenzbereichs.

Da sowohl FTD-Online-Messwerte und Zählwerte des Detektors der LSA außerhalb des Referenzbereichs liegen, ist davon auszugehen, dass eine Verkehrsstörung vorliegt. Die ermittelte Geschwindigkeit des mobilen Endgerätes wird somit als plausibel angesehen und geht in die Darstellung der Verkehrslage mit ein. In der Verkehrszentrale werden folgende Überprüfungen und Interpretationen unter Berücksichtigung des FTD-Bewertungskennwertes (vgl. **Tabelle 3-8**) der online erhobenen Messwerte durchgeführt:



Online-Vergleich			
 Geschwindigkeit FTD	 Verkehrsmengen an LSA	FTD-Bewertungskennwert	Interpretation
<u>Innerhalb</u> des Toleranzbereichs	<u>Innerhalb</u> des Toleranzbereichs	1-3	Geschwindigkeit V- FTD <u>wird genutzt</u> .
<u>Innerhalb</u> des Toleranzbereichs	Es liegen keine Detektordaten vor	1-3	Geschwindigkeit V- FTD <u>wird genutzt</u> .. Allerdings wird der Wert nicht durch Detektoren an LSA gestützt.
<u>Innerhalb</u> des Toleranzbereichs	<u>Außerhalb</u> des Toleranzbereichs	1,2	Geschwindigkeit V-FTD <u>wird genutzt</u> . Allerdings wird der Wert nicht durch Detektoren an LSA gestützt..
		3	Geschwindigkeit V-FTD <u>wird nicht genutzt</u> .
<u>Außerhalb</u> des Toleranzbereichs	<u>Innerhalb</u> des Toleranzbereichs	1,2	Geschwindigkeit V-FTD <u>wird genutzt</u> .
		3	Geschwindigkeit V-FTD <u>wird nicht genutzt</u> .
<u>Außerhalb</u> des Toleranzbereichs	<u>Innerhalb</u> des Toleranzbereichs	1	Geschwindigkeit V-FTD <u>wird genutzt</u> .
<u>Außerhalb</u> des Toleranzbereichs	<u>Außerhalb</u> des Toleranzbereichs	1-3	Geschwindigkeit V -FTD <u>wird genutzt</u> , da eine Verkehrsstörung vorliegt.

Tabelle 3-9: Entscheidungsmatrix beim Vergleich von Online-Messwerten FTD / Detektoren LSA

Bildung streckenspezifischer Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramme

Der Verkehrsablauf auf Straßen wird allgemein mit den Größen Verkehrsstärke q [Kfz/h], Verkehrsdichte k [Kfz/km] sowie der mittleren momentanen Geschwindigkeit \bar{v}_m [km/h] beschrieben. Diese Größen sind durch die Zustandsgleichung

$$q = k * \bar{v}_m$$

verknüpft. Der Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte wird grafisch im so genannten Fundamentaldiagramm dargestellt. Davon abgeleitet werden das Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm (q-v-Diagramm) sowie das Verkehrsdichte-Geschwindigkeits-Diagramm (k-v-Diagramm). Der Zusammenhang zwischen diesen drei Diagrammen ist schematisch in der folgenden **Bild 3-24** dargestellt.

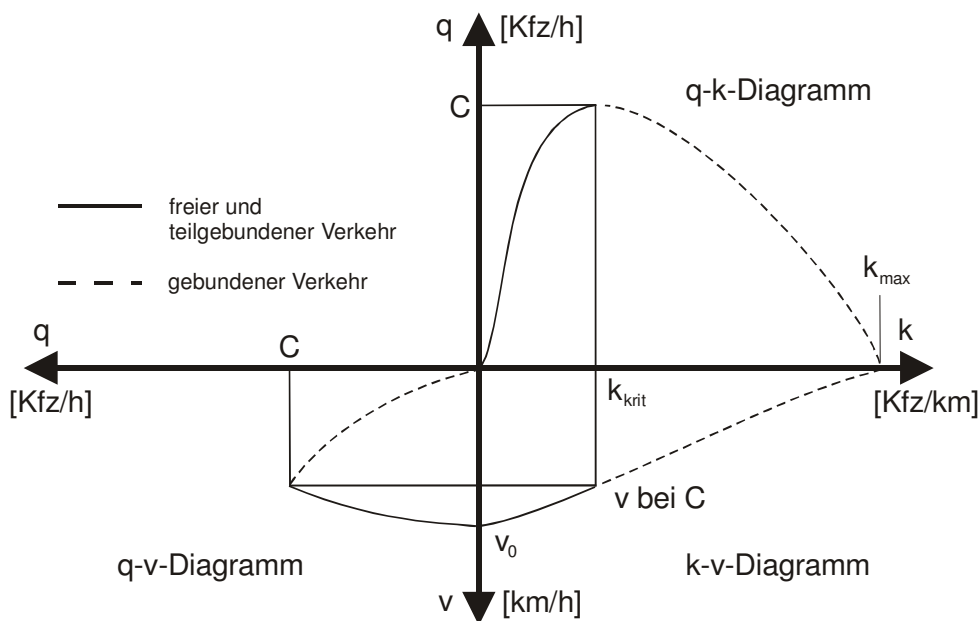


Bild 3-24: Schematische Darstellung des Fundamentaldiagramms
[SCHNABEL, LOHSE, 1997]

Die in **Bild 3-24** dargestellten Funktionen werden aus empirischen Messungen durch Regressionsrechnungen ermittelt. Ab einer kritischen Verkehrsdichte k_{krit} wird die maximal abfließende Verkehrsstärke q erreicht. Dieser Wert wird auch als Kapazität C [Kfz/h] einer Strecke definiert. Die Ausprägung der einzelnen Diagramme hängt stark von den örtlichen Gegebenheiten ab. Bei der Berechnung der q-v-Diagramme für Autobahnen wird daher noch eine Differenzierung mit den Kriterien wie Steigungen, Gefälle, Anzahl der Fahrstreifen, Geschwindigkeitsbeschränkungen und der Schwerverkehrsanteil vorgenommen [FGSV, 2001]. Die für die vorliegende Arbeit gemessenen Detektorwerte und Geschwindigkeiten in einzelnen Streckenabschnitten könnten auch für die Berechnung streckenspezifischer q-v-Diagramme herangezogen werden. Durch diesen Ansatz ist es möglich, aus den gemessenen Verkehrsmengen eines Detektors direkt auf die voraussichtliche momentane Geschwindigkeit in einem Streckenabschnitt zu schließen, ohne dass Geschwindigkeitswerte mobiler Herkunft (Mobilfunkgeräte) für ein Zeitintervall vorliegen. Für innerstädtische Verkehrsnetze wurden bereits 1979 von **STAADT, RETZKO [1979]** erste Überlegungen dazu angestellt. Die Erzeugung streckenspezifischer Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramme erscheint u.a. ein möglicher Ansatz um auf momentane Geschwindigkeiten für einzelne Streckenabschnitte schließen zu können.

Zur Vertiefung dieses Ansatzes wurden mehrere Messungen in Darmstadt durchgeführt. Die für die vorliegende Arbeit mit Mobiltelefonen durchgeführten Messfahrten beschränkten sich auf ein Zeitintervall von 8.00 Uhr bis 13.00 Uhr. Für drei ausgewählte Knotenpunktzufahrten in Darmstadt werden die gemessenen Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken in Diagrammen dargestellt. Der Zulauf einer Knotenpunktzufahrt ist dabei in mehrere Streckenabschnitte unterteilt. Diese Unterteilung lehnt sich an das vom Kartenhersteller genutzte Datenmodell an. Die in **Bild 3-25** jeweils rechts dargestellten Streckenabschnitte befinden sich unmittelbar vor einer LSA. Sie haben eine Länge zwischen 50 und 100 Metern.

3 Verfahrensentwicklung „Floating Traveller Data (FTD)“

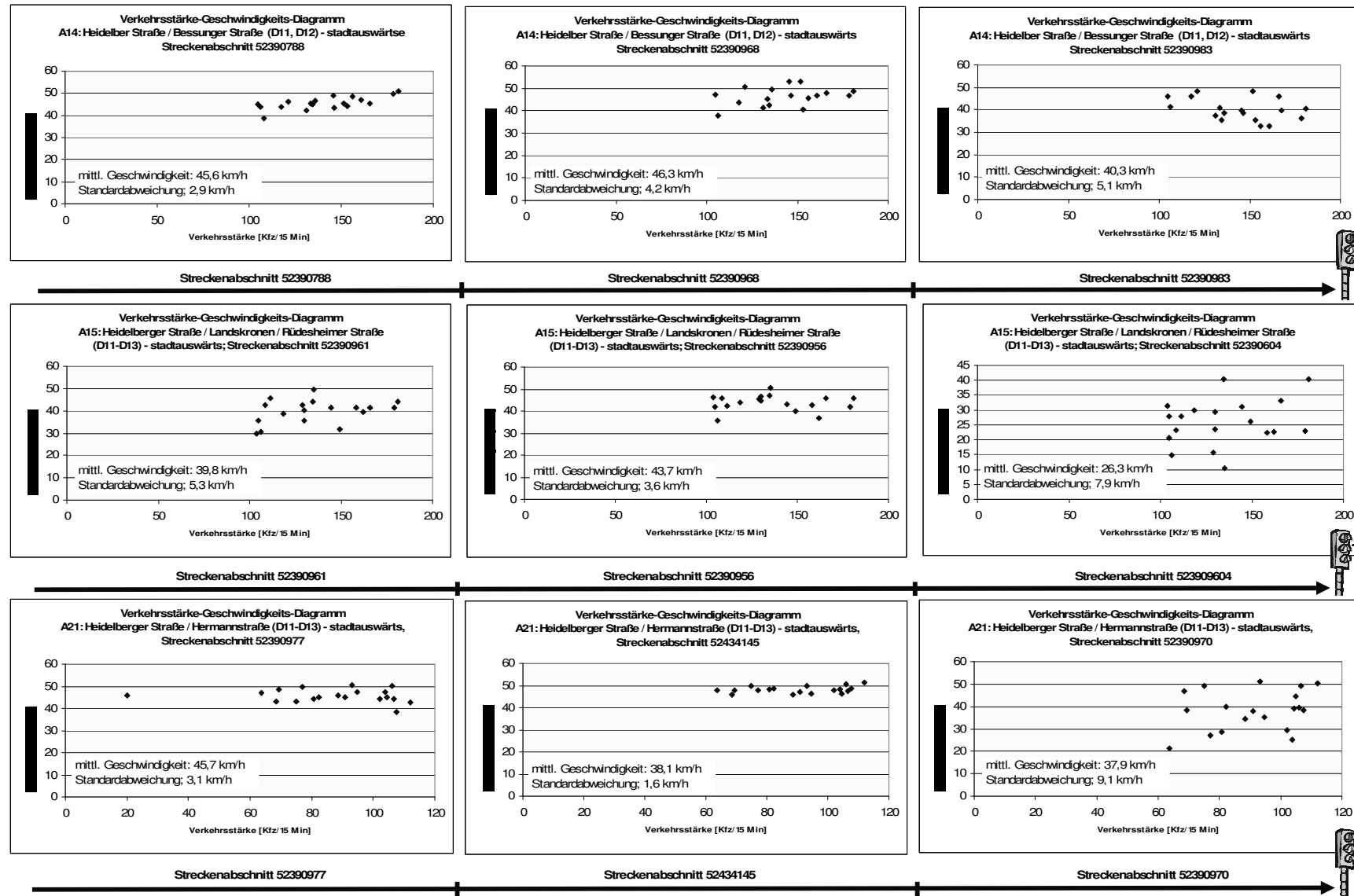


Bild 3-25: Geschwindigkeits-Verkehrsstärke-Diagramme an drei Knotenpunktzufahrten in Darmstadt, unterteilt in jeweils drei Streckenabschnitte (letzter, rechter Streckenabschnitt befindet sich an LSA)

Bei einer Analyse der in **Bild 3-25** dargestellten Geschwindigkeits-Verkehrsstärke-Diagrammen wird deutlich, dass auf den jeweils ersten Streckenabschnitten (Links und Mitte) vor einer LSA die Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Verkehrsstärken ähnliche Werte annehmen. Im letzten Streckenabschnitt vor der LSA (jeweils Rechts) treten dagegen größere Streuungen der ermittelten Geschwindigkeiten auf. Diese Beobachtungen werden auch durch die jeweils größeren Standardabweichungen in den letzten Streckenabschnitten gegenüber den Vorherigen belegt. Die folgenden Erkenntnisse werden aus diesen Beobachtungen gezogen:

- In dem unmittelbar vor einer LSA gelegenen Streckenabschnitt (Länge max. 100 m) treten unabhängig von der Verkehrsstärke größere Geschwindigkeitsschwankungen auf. Je nach Signalisierungszustand der LSA (rot, grün) müssen die Fahrzeuge anhalten bzw. können ohne Halt den Knotenpunkt passieren, wodurch es zu diesen Schwankungen kommt.
- Auf den übrigen Streckenabschnitten, die sich nicht unmittelbar vor einer LSA befinden, kann die Geschwindigkeit von den Verkehrsteilnehmern frei gewählt werden und wird begrenzt durch die maximal zulässige Geschwindigkeit. Der Zufluss in diese Streckenabschnitte wird begrenzt durch die vorgelagerte LSA, wodurch es selten zu Verkehrsüberlastungen durch zu hohes Verkehrsaufkommen kommt.
- Im innerstädtischen Bereich haben Kriterien wie Länge der Grünzeiten an einer Lichtsignalanlage, Einmündungen, Radverkehr, Fahrbahnquerschnitt, Erschließungsansprüche Haltestellen des öffentlichen Verkehrs Einfluss auf die Geschwindigkeits-Verkehrsstärke-Beziehung. Bei einer Standardisierung von Geschwindigkeits-Verkehrsstärke-Diagrammen sollten diese Kriterien mit in die Betrachtungen einbezogen werden.
- Die Definition von Geschwindigkeits-Verkehrsstärke-Beziehung für innerstädtische Straßen unter Berücksichtigung der vorgenannten Aspekte bedarf einer kritischen Prüfung in Forschungsarbeiten.

Bei den derzeit umgesetzten FTD-Verfahren in Darmstadt werden keine Geschwindigkeits-Verkehrsstärke-Diagrammen berechnet, da die Grünzeiten an LSA sehr starken Einfluss auf die Diagramme haben. Denkbar ist allerdings die Entwicklung eines Verfahrens, das sowohl die Grünzeiten einzelner Knotenpunktzufahrten, das detektierte Verkehrsaufkommen und die Anzahl der Fahrstreifen berücksichtigt.

3.6.5 Ermittlung der Verkehrslage / Qualität des Verkehrsablaufs

Bei der Beschreibung des Verkehrszustands wird eine Kategorisierung der gemessenen Verkehrskenngrößen vorgenommen. Ein Verfahren hierzu wird im *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* [FGSV, 2001] dargestellt. Danach wird in Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (LOS, Level-of-service) unterschieden. Auf Autobahnen wird als Qualitätskriterium die mittlere Fahrgeschwindigkeit von Personenkraftwagen für eine Beurteilung herangezogen. Auf Landstraßen dagegen wird die Verkehrsdichte in Abhängigkeit von der Kurvigkeit, der Steigungsklasse und des Schwerverkehrsanteils der Strecke bewertet. Im innerörtlichen Verkehrsnetz sind Knotenpunkte die maßgeblichen Netzelemente, die hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zu bewerten sind. Das HBS empfiehlt die Bewertung des Qualitätskriteriums „Wartezeit“, die sich aus der klassischen Leistungsfähigkeitsberechnung ergibt.

Eine Empfehlung zur Beurteilung der Geschwindigkeiten im innerstädtischen Verkehrsnetz gibt das HBS bislang nicht. Allerdings machen **BRILON, SCHNABEL [2003]** den Vorschlag, im HBS zukünftig die Reisegeschwindigkeiten auf Streckenabschnitten in die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen mit einfließen zu lassen.

Der derzeitige Ansatz im HBS für Knotenpunkte mit einer Beurteilung der Wartezeit an einer Zufahrt kann als Ermittlung von Zeitverlusten auf einem Streckenabschnitt angesehen werden. Reisezeitverluste werden auch aus dem Maß der Abweichung der gemessenen Geschwindigkeit vom unbelasteten / ungestörten Netzelement errechnet. Dieser Ansatz soll daher analog zum HBS mit einer Klassifizierung des Verkehrsablaufs in den Qualitätsstufen A bis F verfolgt werden.

Für ein unbelastetes Verkehrsnetz gilt, dass die Fahrzeuge die Geschwindigkeit innerhalb der zulässigen Geschwindigkeit frei wählen können. Diese, im unbelasteten Verkehrsnetz ermittelte momentane Geschwindigkeit, wird als Maximalgeschwindigkeit v_{\max} definiert. Bei der Beurteilung der Verkehrsqualität muss ein Vergleich zwischen der aktuellen momentanen Geschwindigkeit v_m mit der im unbelasteten Netz abgeleiteten Maximalgeschwindigkeit v_{\max} durchgeführt werden. Die Definition bzw. die Ermittlung der Maximalgeschwindigkeit v_{\max} ist somit besonders sorgfältig vorzunehmen, da dieser Kennwert eine wichtige Bezugsgröße zur Qualitätsbestimmung ist. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten der Definition. Eine Möglichkeit besteht in der Übernahme der Geschwindigkeitskategorien, die in den Datenmodellen von kommerziellen Anbietern (z.B. NAVTEQ, Teleatlas) bereits abgelegt sind. Diese Datenmodelle hinterlegen die Geschwindigkeiten gemäß der Straßenklassifizierung. Jedes Netzelement wird mit einem pauschalen Geschwindigkeitsattribut versehen (z.B. 50 Km/h auf einer innerstädtischen Bundesstraße). Es erscheint allerdings nicht realistisch, dass diese Werte repräsentativ sind. Im Forschungsprojekt WAYflow wurde bei der Entwicklung von CityFCD davon ausgegangen, dass nachts das Straßennetz unbelastet ist. Zur Ermittlung der Maximalgeschwindigkeit im unbelasteten Netz wurden daher Messfahrten durchgeführt (vgl. **LEHMANN [2001]**). Das Problem dabei war, dass sich durch Standzeiten an LSA die Reisezeiten in betroffenen Streckenabschnitten verlängert

haben. Bei einer weiteren Messfahrt über denselben Streckenabschnitt können bei einer unbehinderten Fahrt dann kürzere Reisezeiten gemessen werden.

Unter Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse wird für den Anwendungsfall FTD die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise definiert:

1. Übernahme der Maximalgeschwindigkeit v_{\max} aus Datenmodellen

Wurden noch keine Referenzganglinien der Geschwindigkeiten nach den in **Kapitel 3.6.4** beschriebenen Verfahren berechnet, werden die Informationen aus den Straßenmodellen von Datenbankanbietern übernommen. Diese zwar ungenauen Werte liefern flächendeckend Informationen zu angenommenen Maximalgeschwindigkeiten mit einer Unterscheidung nach Straßenkategorien.

2. Ermittlung Referenzgeschwindigkeit v_{\max} aus Messungen

Durch den bei FTD verfolgten Ansatz wird sukzessive eine Datenbasis der gefahrenen Geschwindigkeiten in Streckenabschnitten aufgebaut. Diese können, in Abhängigkeit von der Tageszeit, stark schwanken. Es kann davon ausgegangen werden, dass es Zeiten mit sehr geringer Verkehrsnachfrage gibt. Der genaue Zeitpunkt lässt sich allerdings nicht für alle Straßenabschnitte vorhersagen. Liegen Referenzganglinien der Geschwindigkeiten für einen Streckenabschnitt vor (vgl. **Kapitel 3.6.4**), ist die Maximalgeschwindigkeit der Messreihe als Geschwindigkeit v_{\max} zu nutzen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Referenzganglinien Lücken aufweisen können, für die noch keine Messergebnisse vorliegen. Werden die Messungen in 15-Minuten-Zeitintervallen abgelegt, ergeben sich für eine Tagesbetrachtung 96 Einzelmesswerte. Für eine Analyse der Referenzganglinie zur Ermittlung der Referenzgeschwindigkeit v_{\max} wird empfohlen, dass mindestens 72 Einzelmesswerte (18 Stunden) vorliegen sollen.

In Anlehnung an das amerikanische Highway-Capacity-Manual [**HCM, 2000**] werden die Qualitätsstufen wie folgt definiert:

Qualitätsstufe	Verhältnis v_{\max} / v_{akt}	Beschreibung
A	$\frac{v_{\max}}{v_{akt}} \leq 1,1$	Freier Verkehrsfluss. Keinerlei Behinderungen durch andere Verkehrsteilnehmer.
B	$1,1 < \frac{v_{\max}}{v_{akt}} \leq 1,4$	Es ist ein leicht erhöhtes Verkehrsaufkommen zu verzeichnen.
C	$1,4 < \frac{v_{\max}}{v_{akt}} \leq 2,0$	Es ist ein erhöhtes Verkehrsaufkommen zu verzeichnen. Größere Behinderungen sind nicht zu erwarten.
D	$2,0 < \frac{v_{\max}}{v_{akt}} \leq 2,5$	Das Verkehrsaufkommen ist groß. Teilweise kommt es zu zähfließendem Verkehr.
E	$2,5 < \frac{v_{\max}}{v_{akt}} \leq 3,2$	Das Verkehrsaufkommen ist groß. Es kommt zu stockendem Verkehr.
F	$\frac{v_{\max}}{v_{akt}} > 3,2$	Das Verkehrsaufkommen ist sehr groß. Eine dauerhafte Stausituation tritt ein.

Tabelle 3-10: Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs (Kriterium: Geschwindigkeit)

Bei einer Visualisierung der Qualität des Verkehrsablaufs für Verkehrsteilnehmer ist eine Unterteilung in drei Klassen verständlicher (z.B. grün, gelb, rot). Der in dieser Arbeit verfolgte Bewertungsansatz orientiert sich allerdings an gängigen Standards der Verkehrswissenschaft.

3.7 FTD-Verfahren – Öffentlicher Verkehr

3.7.1 Einleitung

Durch die Nutzung von Daten mobiler Herkunft („Floating Traveller Data (FTD)“) können auch Informationen zur Verkehrssituation im Öffentlichen Verkehr abgeleitet werden. Dies geschieht durch einen Soll-/Ist-Vergleich der Fahrplandaten mit den aktuellen Positionen von Fahrgästen, die sich in einem Fahrzeug des ÖPNV befinden. Um diesen Vergleich der Soll-Fahrplandaten mit den in einer Zentrale eingehenden Bewegungsdaten durchführen zu können, ist die Kenntnis über die vom Verkehrsteilnehmer genutzte ÖV-Linie und Kursnummer erforderlich. Eine automatisierte Erkennung der ÖV-Linie und der Kursnummer ist ohne fahrzeugseitige Ausstattung derzeit nicht möglich. Es sollen nachfolgend dennoch Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt werden, wie eine automatisierte Erkennung der ÖV-Linie durchgeführt werden kann.

Das Konzept sieht derzeit vor, dass der Verkehrsteilnehmer vor Reiseantritt seine Reise plant. Diese Route wird dann in der Zentrale hinterlegt. Bei einer Reise mit dem ÖV weiß das System, welche Linien genutzt werden und zu welchen Uhrzeiten die Verkehrsteilnehmer an einzelnen Haltestellen eintreffen (Sollfahrplan). Ein Beispiel dieser Vorgehensweise zeigt **Bild 3-26**. Hier wird ein Reisender zwischen Darmstadt und Frankfurt betrachtet. Laut Sollfahrplan ist vorgesehen, dass der Reisende um 14:15 Uhr an der betrachteten Haltestelle eintreffen soll. Das Fahrzeug hat allerdings eine vierminütige Verspätung. Da der Reisende mit einem mobilen Endgerät seine Positionen und die jeweiligen Ankunftszeiten an Haltestellen an die Zentrale überträgt, kann die Verspätung des Fahrzeugs erfasst werden.

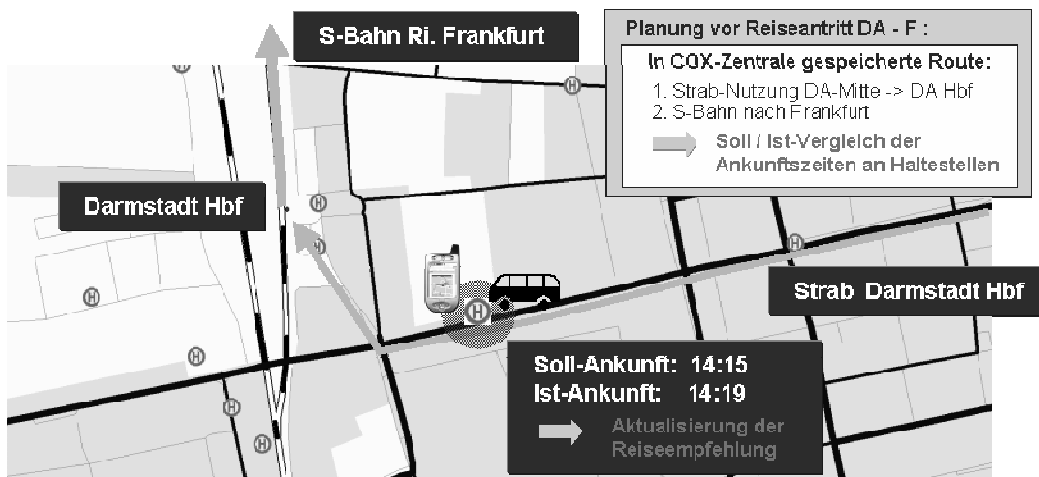


Bild 3-26: Beispiel ÖV-FTD – Fahrt zwischen Darmstadt und Frankfurt

Der Stichprobenumfang der Datenerfassung spielt im Gegensatz zum Motorisierten Individualverkehr eine untergeordnete Rolle, da sich der Verkehrsteilnehmer in einem Bus, bzw. einer Straßenbahn befindet, von dem die exakten Fahrplandaten für dieses Fahrzeug bekannt sind. Die Positionsübermittlung und Uhrzeit von nur einer Person mit Mobilsystem reicht somit aus, einen Soll-/Ist-Vergleich des Fahrplans durchführen zu können. Verspätungen werden sofort erkannt.

3.7.2 Ist-Fahrplan

Datenmodell

Damit das FTD-Verfahren für den Öffentlichen Verkehr eingesetzt werden kann, sind zunächst die folgenden Voraussetzungen zu erfüllen:

- Abbildung des Sollfahrplans in einem Datenmodell für den Öffentlichen Verkehr.
- Georeferenzierung der Haltestellen bzw. der Haltestellenmasten.

Vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) wurde ein Datenmodell für den ÖPNV entwickelt [VDV, 2001], das für die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen aufgegriffen und punktuell verändert wurde. Wie die einzelnen Tabellen in Relation zueinander stehen zeigt **Bild 3-27**.

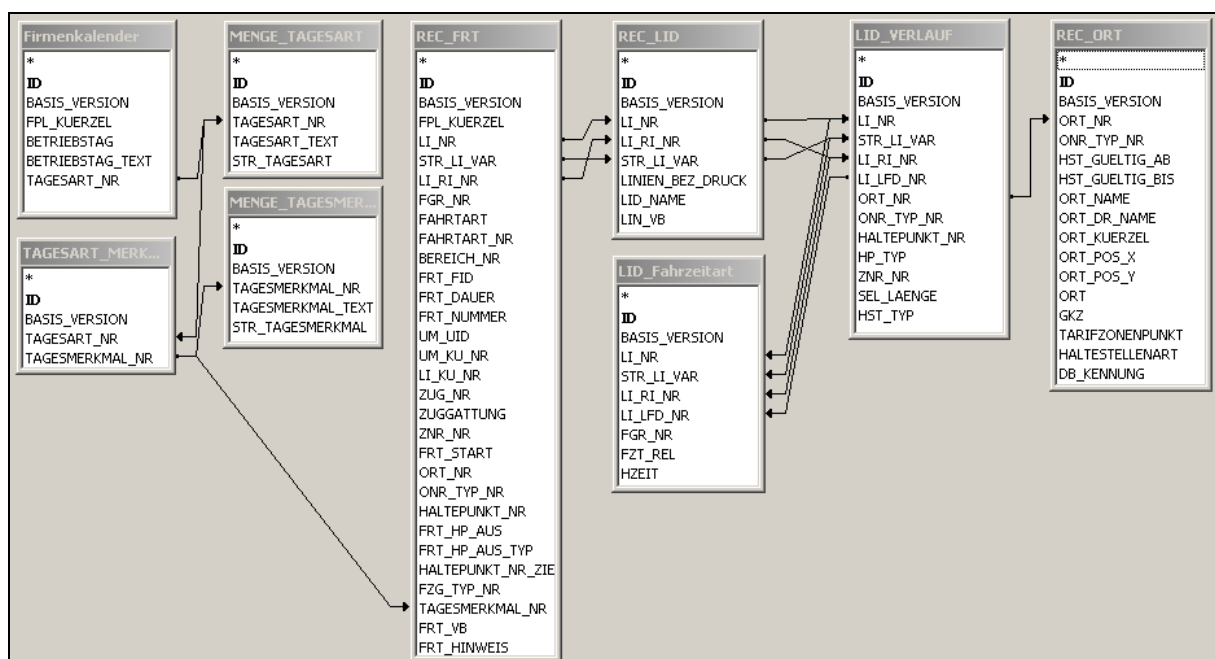


Bild 3-27: ÖPNV-Datenmodell (angelehnt an [VDV, 2001])

Zum besseren Verständnis einige Erläuterungen zu den einzelnen Tabellen:

- In einem „Fimenkalender“ sind alle Tagesarten eines Kalenderjahres hinterlegt. Es wird unterschieden in Werktage, Samstage, Sonntage, Feiertage oder Tage mit besonderen Ereignissen.
- In einer Tabelle „REC_FRT“ sind alle möglichen Fahrten von Fahrzeugen einzelner Linien und Linienrichtung an einem Tag hinterlegt. Darin sind die Starthaltestellen, die zugehörige Abfahrtszeit mit Tagesmerkmal (So, Mo, etc.) hinterlegt.
- Durch die Verknüpfung mit einer Tabelle zum Linienverlauf („LID_Verlauf“) wird festgelegt, welche Haltestellen von den Fahrzeugen einer bestimmten Linie unter Berücksichtigung der Fahrtrichtung, Tagesart und Uhrzeit angefahren werden. Die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen und die Haltezeiten sind ebenfalls hinterlegt.

- Zu jeder Haltestelle kann es eine oder mehrere Haltepositionen geben. In der Regel gibt es immer zwei Haltepositionen (Richtung und Gegenrichtung). An Umsteigestationen (z.B. ein Hauptbahnhof) gibt es unter einer Haltestellenbezeichnung eine Vielzahl von Haltepunkten. Alle Haltepunkte sind daher separat in einer Tabelle „REC_ORT“ zu erfassen.

Von der HEAG-Verkehrs GmbH (Betreiber des ÖPNV in Darmstadt) wurde der Sollfahrplan aller Fahrzeuge in das zuvor beschriebene Datenmodell übertragen. Außerdem wurden die Positionen der Haltestellen mit einem GPS-Empfänger vermessen. Die so ermittelten Geokoordinaten wurden an den Haltepunkten im Datenmodell hinterlegt. Wird in einem nächsten Schritt eine bestimmte Fahrt einer Linie ausgewählt, können die Haltepositionen (mit Geokoordinaten) und die Abfahrtszeiten aus Datenbankabfragen ermittelt werden. Die Ergebnisse der Abfragen sind Eingangsgrößen für die zentralseitigen Berechnungen der Verspätungen. Ein Beispiel eines so ermittelten Fahrplans der Straßenbahnlinie 1 am 24.8.2004 zeigt **Tabelle 3-11**. Die Geokoordinaten sind zur besseren Übersicht in dem Beispiel nicht mit dargestellt.

Orts-Nr.	Ortsname	Haltepunkt-Nr.	Startzeit	Fahrzeit [s]	Haltezeit [s]	Abfahrt
62	Darmstadt Hauptbahnhof	2	19:03:00	0	0	19:03:03
13	Darmstadt Berliner Allee	2	19:03:00	72	18	19:04:36
144	Darmstadt Rhein-/Neckarstraße	2	19:03:00	42	18	19:05:39
36	Darmstadt Eschollbrücker Str.	2	19:03:00	66	18	19:07:06
137	Darmstadt Prinz-Emil-Garten	2	19:03:00	48	18	19:08:15
15	Darmstadt Bessunger Straße	2	19:03:00	42	18	19:09:18
105	Darmstadt Landskronstraße	2	19:03:00	72	18	19:10:51
112	Darmstadt Marienhöhe	2	19:03:00	78	18	19:12:30
49	Darmstadt Friedrich-Ebert-Str.	2	19:03:00	54	18	19:13:45
175	Von-Ketteler-Straße	2	19:03:00	48	18	19:14:54
89	Darmstadt Katharinenstraße	2	19:03:00	54	18	19:16:09
33	Eberstadt/Wartehalle	2	19:03:00	42	24	19:17:18
116	Darmstadt Modaubrücke	2	19:03:00	72	18	19:18:51

Tabelle 3-11: Beispiel eines Fahrplans (Linie 1 am 24.08.04) mit Haltestellenabfolge

Datenreduktion durch Ausdünnung von Bewegungsdaten

Das Systemkonzept sieht vor, dass die mit mobilen Endgeräten generierten „Floating Traveller Data (FTD)“ in der Zentrale ausgewertet werden. Um die Telekommunikationskosten möglichst gering zu halten, besteht die Forderung, das Datenaufkommen zwischen Zentrale und Endgerät zu minimieren. Es wurde daher ein Verfahren entwickelt, das die in 1-Sekunden-Intervallen aufgezeichneten Positionspunkte soweit reduziert, dass dennoch das Bewegungsprofil erhalten bleibt. Das Konzept für den Öffentlichen Verkehr sieht vor, dass ein Positionspunkt gesetzt wird, wenn keine Positionsänderungen des mobilen Endgeräts innerhalb von 10 Sekunden festgestellt werden. Dieser Positionspunkt kann dann eine Haltestelle oder einen Halt auf der Strecke repräsentieren. Das entwickelte Verfahren wurde bereits in **Kapitel 3.4.3** beschrieben.

Haltestellenselektion

Der Soll-Ist-Vergleich der Fahrplandaten muss nur für Haltestellen einer geplanten Route eines Verkehrsteilnehmers durchgeführt werden, die in der Zentrale hinterlegt sind. Daher sind durch Datenbankabfragen zunächst die relevanten Haltestellen zu filtern, um den späteren Berechnungsaufwand zu minimieren.

Ermittlung von ÖV-Linie und Kursnummer

Automatisierte Erkennung

Um die Eingaben am mobilen Endgerät durch den Verkehrsteilnehmer zu minimieren, ist eine automatische Erkennung der aktuell genutzten ÖV-Linie und der Kursnummer anzustreben. Dies hat den Vorteil, dass hieraus nicht nur Echtzeitfahrplandaten gewonnen werden können, sondern auch – bei einer hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit – Bezahlfunktionen (Electronic-Ticketing) eingeführt werden können. Nachfolgend wird ein möglicher Lösungsweg beschrieben, der bislang noch nicht erprobt werden konnte.

Die automatisierte Erkennung der ÖV-Linie basiert auf einer fortlaufenden Analyse der Haltepositionen des sich in einem ÖV-Fahrzeug befindenden Verkehrsteilnehmers. Durch Datenbankabfragen, in denen die Haltestellen-ID der angefahrenen Haltestellen integriert sind, lassen sich die dort anhaltenden Linien und die Kursnummer herausfiltern. An Hand eines Beispiels soll die Vorgehensweise näher erläutert werden.

Bild 3-28 zeigt den Ausschnitt eines Liniennetzes mit drei Haltestellen, einer Buslinie und einer Straßenbahnlinie. Ein Verkehrsteilnehmer steigt an Haltestelle 1 mit einem mobilen Erfassungsgerät in ein ÖV-Fahrzeug ein. Durch die Übertragung der Position des Verkehrsteilnehmers wird zentralenseitig durch das MapMatching festgestellt, dass sich der Verkehrsteilnehmer an Haltestelle 1 befindet. Durch eine Einbindung der Haltestellen-ID, Datum und der Uhrzeit in eine Datenbankabfrage kann im ÖV-Datenmodell eine Auswahl der möglicherweise gewählten ÖV-Linie durchgeführt werden. Da Haltestelle 1 von einer Straßenbahn und einem Bus angefahren wird, ist eine eindeutige Identifizierung allerdings nicht möglich. Fährt das Fahrzeug die Haltestelle 3 an, ist eine eindeutige Zuordnung möglich, da die Buslinie hier nicht anhält. Es kommt daher nur die Straßenbahn als genutztes Fahrzeug in Frage.

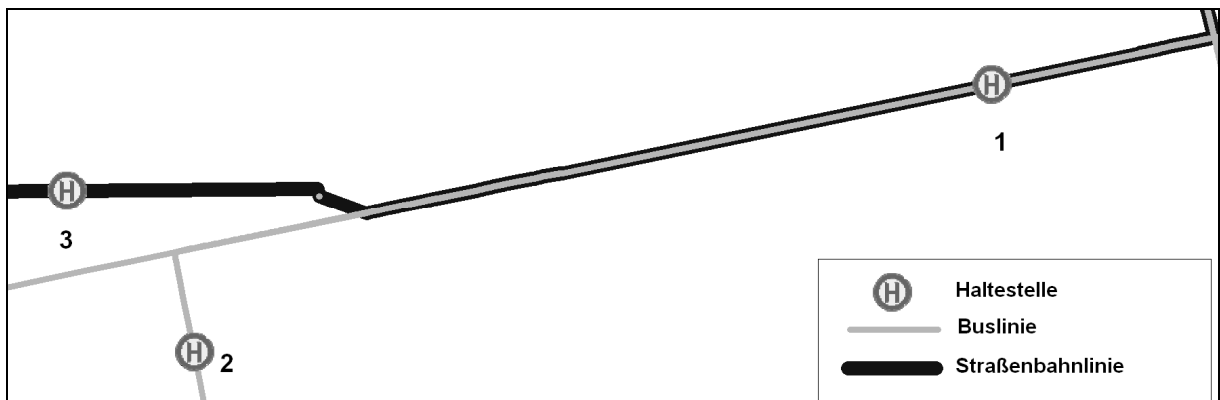


Bild 3-28: Ausschnitt mit Straßenbahnlinie und Buslinie in Darmstadt

Dieses Beispiel beschreibt die prinzipielle Vorgehensweise der automatisierten Erkennung von ÖV-Linie und Kursnummer. In Innenstädten gibt es Hauptachsen des Öffentlichen Verkehrs, auf denen unterschiedliche Linien verkehren. Durch das beschriebene Verfahren ist in diesen Bereichen keine eindeutige Zuordnung möglich. Es kann lediglich eine Vorauswahl möglicher Linien erfolgen. An Verzweigungsstellen der Linien konkretisiert sich dann das Resultat. In die Datenbankabfragen sind die bislang angefahrenen Haltestellen zu integrieren, da durch die rückblickende Betrachtung das Abfrageergebnis verbessert werden kann.

In einer Erprobungsphase ist auch eine semiautomatische Erkennung denkbar, in dem der Verkehrsteilnehmer durch eine Vorauswahl der in Frage kommenden ÖV-Linien am Endgerät die tatsächlich genutzte Linie auswählen kann. Er kann dadurch sicherstellen, dass in der Zentrale das gewählte Fahrzeug bzw. die richtige Kursnummer hinterlegt ist. Treten Störungen im Betriebsablauf auf, kann der Verkehrsteilnehmer dann über Reisealternativen informiert werden.

Manuelle Ermittlung

Alternativ dazu kann in einem manuellen Verfahren der Reisende die genutzte Linie und Kursnummer eingeben. Darauf wurde zuvor bereits eingegangen. Dieses Verfahren wurde in der Erprobungsphase des FTD-Verfahrens für den ÖV umgesetzt.

Bestimmung der Ist-Ankunftszeiten an Haltestellen

Durch eine räumliche Abfrage ist zu prüfen, ob sich eine Haltestelle der aktuellen Linie und Fahrtrichtung in einer Entfernung von 50 Metern vom ermittelten Positionspunkt der Bewegungsspur befindet.

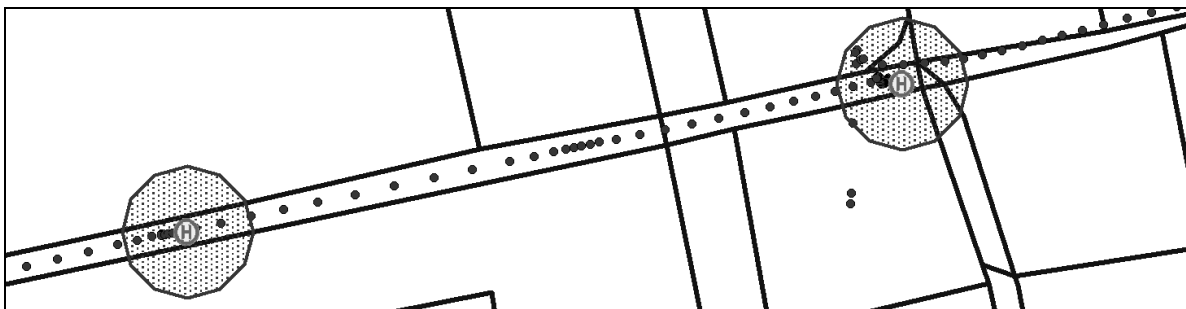


Bild 3-29: Zuordnung von Bewegungsspuren zu Haltestellen

Positivfall:

Eine Haltestelle befindet sich im Bereich des Positionspunktes.

→ Vergleich zwischen Soll- und Ist-Ankunftszeit.

Negativfall:

Es befindet sich keine Haltestelle im Bereich des Positionspunktes.

→ Es befindet sich keine Haltestelle in der Nähe. Es handelt sich um eine Verzögerung / Störung. Es kann zu Fahrplanabweichungen kommen.

Da der ermittelte Positionspunkt mit einem Zeitstempel versehen ist, kann für einen haltestellennahen Punkt durch Differenzbildung die Verspätung ermittelt werden:

$$\Delta t_i = t_{i, \text{Ankunft-Soll}} - t_{i, \text{Ankunft-Ist}} - \Delta HZ \quad \text{Gleichung 3-30}$$

mit:

- i = Haltestelle i
- Δt_i = Differenz zwischen Soll-Ankunft und Ist-Ankunft
- $t_{i, \text{Ankunft-Soll}}$ = Soll-Ankunftszeit an Haltestelle i
- $t_{i, \text{Ankunft-Ist}}$ = Ist-Ankunftszeit an Haltestelle i
- ΔHZ = 15 Sekunden – Parameter der Spurausdünnung für ÖV-Bewegungsspuren; nach welcher Zeit ein Punkt gesetzt werden, wenn keine Positionsänderung stattfindet.

Geometrische Beschreibungen

Zur Überprüfung, ob sich eine Haltestelle im Bereich eines Bewegungspunktes befindet, ist eine räumliche Abfrage durchzuführen. Dazu wird auf der Kreisbahn (Puffer um die Haltestelle) n Zwischenpunkte eingeführt, für die die einzelnen Koordinaten zu berechnen sind (vgl. **Bild 3-30**).

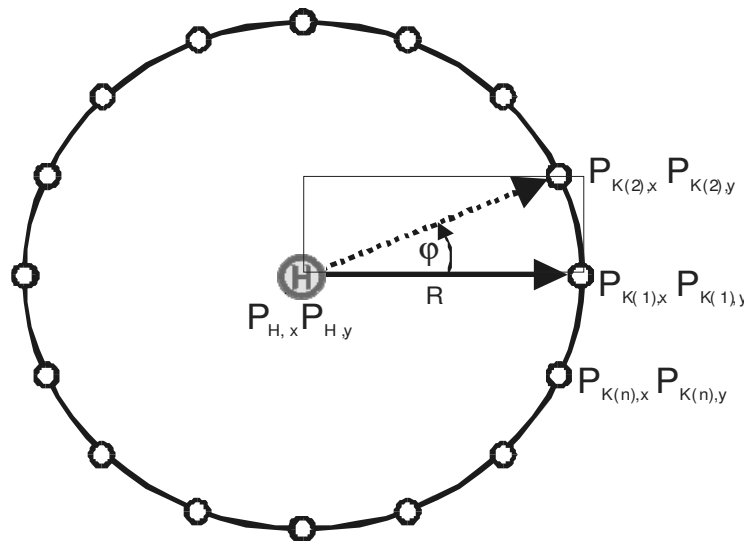


Bild 3-30: Idealisierung eines Kreises mit Zwischenpunkten

Die Koordinaten der Punkte ($P_{K(1)}$ bis $P_{K(n)}$) auf der Kreisbahn sind abhängig vom Radius R des Suchkreises und vom Winkel φ . Sie errechnen sich zu

$$\begin{aligned} P_{k(i),x} &= P_{H,x} + R * \cos(\varphi(i)) \\ P_{k(i),y} &= P_{H,y} + R * \sin(\varphi(i)) \end{aligned} \quad \text{Gleichung 3-31}$$

mit:

$P_{k(i),x}$	= x-Koordinate des Punkt i auf dem Kreis
$P_{k(i),y}$	= y-Koordinate des Punkt i auf dem Kreis
$P_{H,x}$	= x-Koordinate der Haltestelle
$P_{H,y}$	= y-Koordinate der Haltestelle
$\varphi(i)$	= Winkel zum betrachteten Punkt i auf dem Kreis
R	= Radius

Um zu überprüfen, ob sich ein Positionspunkt eines Mobilfunkgerätes innerhalb eines Radius von 50 Metern um eine Haltestelle befindet, wird der Suchkreis in mehrere Rechtecke zerlegt. Die Rechtecke spannen jeweils einen Fläche zwischen den Punkten $P_{K(1)}$, $P_{K(2)}$, P_H , ... $P_{K(n-1)}$, $P_{K(n)}$, P_H auf.

Zur Berechnung der einzelnen Punkte $P_{K(1)}$ bis $P_{K(n)}$, wird $\varphi(i)$ um 0 bis 360 Grad in 10 Grad-Schritten erhöht. Für die so definierten Rechtecke ist dann zu überprüfen, ob sich ein Bewegungspunkt P_i innerhalb der Fläche des Rechtecks befindet. **Bild 3-31** ist ein Beispiel eines Bewegungspunktes P_i dargestellt. Der zugehörige Suchraum zum Auffinden naher Haltestellen wird über die Punkte $P_{i,A}$, $P_{i,B}$, $P_{i,C}$, $P_{i,D}$ aufgespannt.

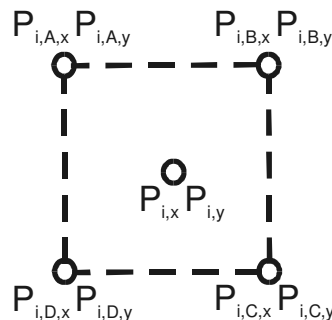


Bild 3-31: Suchraum eines Punktes P_i für die Ermittlung naher Haltestellen

mit:

i	= Index	[-]
$P_{i,...,x}$	= X-Koordinate der Punkte	[m]
$P_{i,...,y}$	= Y-Koordinate der Punkte	[m]

Zur Berechnung der einzelnen Kennwerte sind folgende Schritte durchzuführen:

- Umrechnung von Längen- und Breitengrad in X- und Y-Koordinaten [Metern]:
Die Einzelpositionen werden in Koordinaten des „World Geodetic System“ von 1984 (WGS84) mit der Angabe von Längen- und Breitengrad an die Zentrale übergeben. Die auf die Erdellipsoide bezogenen Koordinaten sind zunächst in flächentreue Meter-Koordinaten umzurechnen. Die Gleichungen zur Umrechnung wurden bereits in **Kapitel 3.4.3** erläutert.

- Berechnung der Koordinaten der Punkte $p_{i,A}$, $p_{i,B}$, $p_{i,C}$, $p_{i,D}$

Die Koordinaten des Bewegungspunktes p sind bekannt und wurden in Meter umgerechnet. Die Koordinaten der Suchraumeckpunkte errechnen sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 p_{i,A,x} &= p_{i,x} - D \\
 p_{i,B,x} &= p_{i,x} + D \\
 p_{i,C,x} &= p_{i,x} + D \\
 p_{i,D,x} &= p_{i,x} - D \\
 p_{i,A,y} &= p_{i,y} + D \\
 p_{i,B,y} &= p_{i,y} + D \\
 p_{i,C,y} &= p_{i,y} - D \\
 p_{i,D,y} &= p_{i,y} - D
 \end{aligned}
 \tag{Gleichung 3-32}$$

mit:

i	= Index	[-]
$p_{i,x}$	= X-Koordinate des Punktes i	[m]
$p_{i,y}$	= Y-Koordinate des Punktes i	[m]
$p_{i,...,x}$	= X-Koordinate der Punkte A-D	[m]
$p_{i,...,y}$	= Y-Koordinate der Punkte A-D	[m]
D	= Entfernung zwischen Bewegungspunkt und Suchraumgrenze: 50 m	[m]

- Überprüfung, ob sich Haltestellen im Suchraum eines Bewegungspunktes befinden. Durch eine Datenbankabfrage wird geprüft, ob sich Haltestellen in der Nähe des Bewegungspunktes p befinden. Dabei sind die folgenden Überprüfungen vorzunehmen:

$$\begin{aligned}
 p_{i,A,x} &\leq p_{i,x} \leq p_{i,B,x} \\
 p_{i,C,y} &\leq p_{i,y} \leq p_{i,B,y}
 \end{aligned}
 \tag{Gleichung 3-33}$$

Positivfall:

Eine Haltestelle befindet sich innerhalb des Suchraumes des Punktes P
 ➔ Vergleich zwischen Soll- und Ist-Ankunftszeit nach **Abschnitt 3.7.2.**

Negativfall:

Es befindet sich keine Haltestelle im Bereich des Positionspunktes.

➔ Es befindet sich keine Haltestelle in der Nähe. Es handelt sich um eine Verzögerung / Störung. Es kann zu Fahrplanabweichungen kommen.

Das hier vorgestellte Verfahren setzt voraus, dass entweder eine automatische Erkennung der ÖV-Linie und der Kursnummer erzielt wird, oder der Reisenden vor Antritt der Fahrt eine Planung durchführt und diese in der Zentrale hinterlegt. Im Online-Betrieb ist dann zu überprüfen, ob der Reisende tatsächlich die zuvor geplante Reise antritt. An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass eine praxistaugliche Weiterentwicklung anzustreben ist. Sollten Busse und Bahnen mit Kommunikationseinrichtungen ausgerüstet werden (z.B. Bluetooth, WLAN oder RFID), die die Fahrzeugkennung an das Mobiltelefon der Verkehrsteilnehmer übertragen, würde die Identifikation der gewählten Linie und der Kursnummer deutlich vereinfacht.

3.8 FTD-Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr (Fußgänger und Radfahrer)

3.8.1 Einleitung

Ziel des FTD-Verfahrens für Fußgänger und Radfahrer ist es, Routinginformationen unter Berücksichtigung von Fußwegen bzw. Radwegen bereitzustellen. Von Datenbankanbietern der Firma NAVTEQ und Teleatlas können nur Verkehrsnetze bezogen werden, in denen das Straßennetz aufgenommen wurde. Fußgänger und Radwege, die sich nicht unmittelbar an einer Straße befinden, werden bislang nur selten in den Datenmodellen hinterlegt. Daher ist das Ziel des FTD-Prozesses für Fußgänger und Radfahrer, die Bewegungsinformationen unterschiedlicher mobiler Endgeräte zu nutzen, um neue Datenbankelemente (Fußwege und Radwege) zu identifizieren. **Bild 3-32** zeigt eine Bewegungsspur eines Fußgängers in der Innenstadt von Darmstadt. Im nördlichen Bereich befindet sich eine Fußgängerzone, die bislang nicht in Datenbanken abgelegt ist. Um jedoch Lotsenfunktionen anbieten zu können, müssen alle Öffentlichen Wege in Datenmodellen abgelegt werden. Nachfolgend wird ein Verfahren beschrieben, mit dem aus einer Vielzahl unterschiedlicher Bewegungsspuren auf bislang nicht vorhandene Datenbankelemente für Fußgänger und Radfahrer geschlossen werden kann.

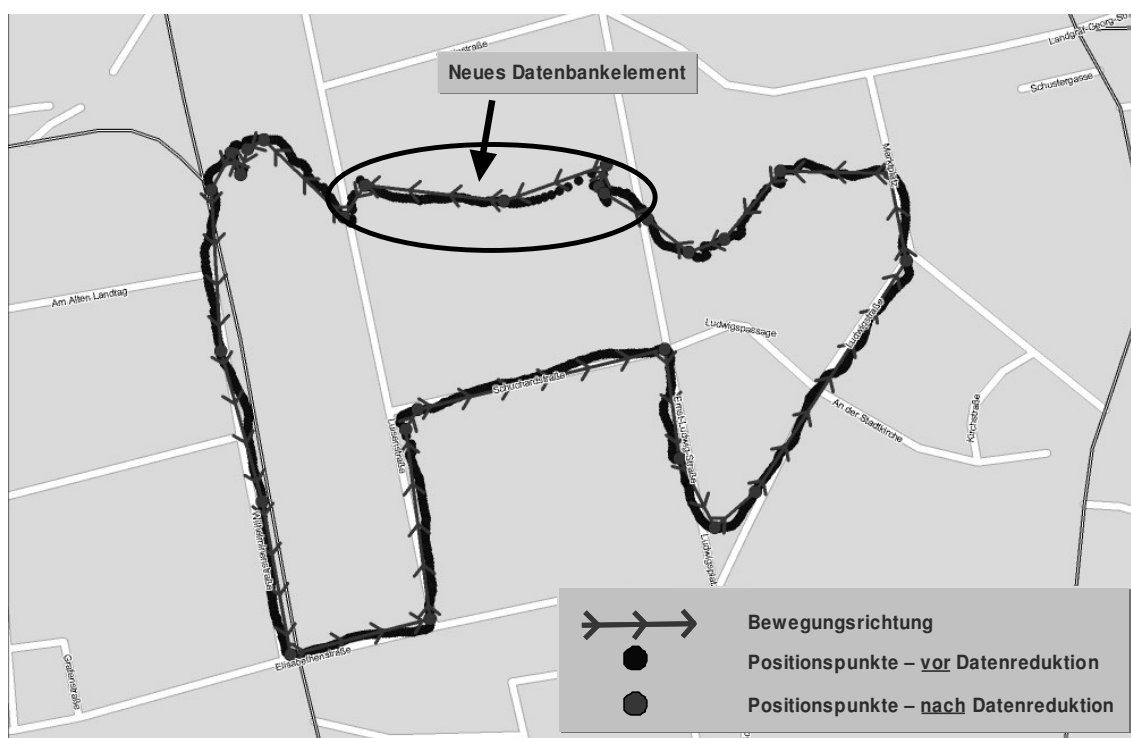


Bild 3-32: Bewegungsspur eines Fußgängers mit Datenreduktion

3.8.2 Zuordnung von Bewegungsspuren zum Datenmodell (MapMatching)

Wie auch im Motorisierten Individualverkehr ist im FTD-Modus Fußgänger oder Radfahrer zentralenseitig eine Zuordnung der Bewegungsspur zu einzelnen Datenbankelementen, die eine Straße, einen Fußweg oder einen Radweg repräsentieren, vorzunehmen. Für das so genannte „MapMatching“ wird ein Modul der PTV-AG eingesetzt, das auch für den Motorisierten Individualverkehr zum Einsatz kommt. Unterscheidungsmerkmal zum MapMatching im Motorisierten Individualverkehr ist lediglich, dass nur solche Streckenabschnitte gefunden werden, die auch von Fußgängern und Radfahrern genutzt werden dürfen. Es wäre falsch, wenn eine Fußgängerspur einer Schnellstraße zugeordnet würde, auf der ausschließlich Kraftfahrzeuge fahren.

Da die meisten Fuß- und Radwege, soweit sie sich abseits von normalen Straßen befinden, bislang nicht in den Datenmodellen abgelegt sind, wird das MapMatching-Ergebnis negativ ausfallen (kein Abschnitt gefunden). In einem solchen Fall ist durch das nachfolgend beschriebene Verfahren zu prüfen, ob neue Datenbankelemente automatisiert generiert werden können, damit sie zukünftig für Lotsendienste zur Verfügung stehen.

3.8.3 Ermittlung neuer Datenbankelemente

Bild 3-33 zeigt die Überlagerung einer Vielzahl von Fußgänger-Bewegungsspuren, die in Darmstadt aufgezeichnet wurden. Die Spuren wurden durch den FTD-Spurausdünnungs-Algorithmus auf dem mobilen Endgerät reduziert (vgl. **Kapitel 3.4.3**) und anschließend an die Zentrale übertragen.

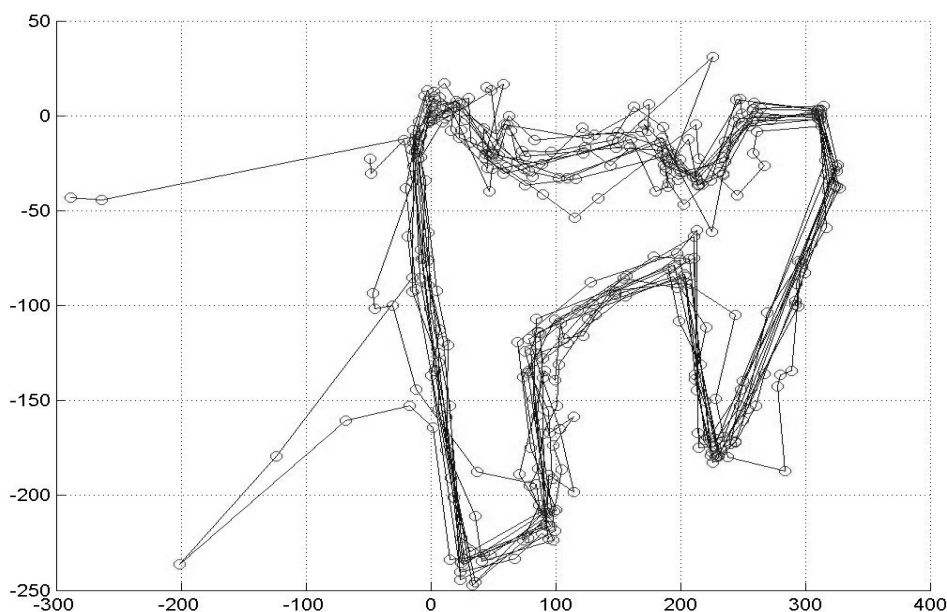


Bild 3-33: Häufung von Bewegungsspuren zur Generierung neuer Datenbankabschnitte für Fußgänger und Radfahrer

In **Bild 3-33** wurde eine festgelegte Strecke mehrfach abgelaufen um das Verfahren zur Erzeugung neuer Netzelemente zu erproben. Bei einem flächendeckenden Einsatz werden nur Teilstrecken und keine geschlossenen Streckenzüge generiert. Das Verfahren berücksichtigt diese Gegebenheiten, so dass Spürhäufungen einzelner Teilabschnitte erkannt werden.

Beim Betrachten der Bewegungsspuren erscheint es relativ einfach, eine Spurhäufung festzustellen, um daraus den Verlauf neuer Datenbankelemente abzuleiten. Doch die Fähigkeiten des menschlichen Gehirns lassen sich nicht ohne weiteres in einem Verfahren zusammenfassen, das alle besonderen Merkmale der Einzelspuren in die Betrachtung einbezieht. Die Aufgabe der Erkennung neuer Datenbankelemente wird daher in drei Phasen unterteilt.

1. Bildung von Clustern nahe beieinander liegender Positionspunkte.
2. Ermittlung von Schwerpunkten der Einzel-Cluster.
3. Überprüfung der Konnektivitäten zwischen den Schwerpunkten der Einzel-Cluster.

Cluster – Bildung

Unter einem Cluster versteht man die Zuordnung einer Vielzahl von Einzelpositionen zu einer zusammenhängenden Einheit. Eine Häufung von Punkten tritt immer dann auf, wenn Personen in diesen Bereichen eine Richtungsänderung vorgenommen haben (z.B. an einer Wegänderung oder Wegkreuzung). Diese Punkthäufungen kennzeichnen Start- bzw. Endpunkte eines Wegelementes.



Ein Beispiel zeigt die kleine Grafik links, in der nahe beieinander liegende Einzelpositionen in einem Cluster zusammengefasst sind. Um ein solches Cluster bilden zu können, müssen zunächst alle Entfernungen zwischen den Einzelpositionen berechnet werden. Hierzu wird eine Entfernungsmatrix aufgebaut. Da die Koordinaten der einzelnen Punkte in Längen- und Breitengrad (WGS84) vorliegen, müssen diese zunächst in Meter-Koordinaten umgerechnet werden (vgl. **Gleichung 3-4, 3-5**). Anschließend sind zwischen allen Punkten die Luftlinienentfernungen in einer Distanzmatrix zu hinterlegen.

Bestimmung des Abstands zwischen zwei Punkten

$$dX_j = p_{i,x} - p_{i+1,x}$$

Gleichung 3-34

$$dY_j = p_{i,y} - p_{i+1,y}$$

$$D_j = \sqrt{dX_j^2 + dY_j^2}$$

mit:	j	= Index der Verbindungslinien zwischen zwei Punkten	[-]
	dX_j	= Abstand der Punkte in X-Richtung	[m]
	dY_j	= Abstand der Punkte in Y-Richtung	[m]
	D_j	= Abstand der Punkte absolut zueinander	[m]
	$p_{i,x}$	= X-Koordinate des Punktes i	[m]
	$p_{i,y}$	= Y-Koordinate des Punktes i	[m]
	$p_{i+1,x}$	= X-Koordinate des Punktes i+1	[m]
	$p_{i+1,y}$	= Y-Koordinate des Punktes i+1	[m]

Zur eigentlichen Cluster-Bildung wird für jeden Positionspunkt geprüft, ob sich in der Nähe ein weiterer Punkt befindet, der die Distanzschwelle D (gewählt: D=5 m) unterschreitet. Diese nahe beieinander liegenden Punkte werden zu einem Cluster zusammengefasst.

Schwerpunktermittlung von Einzel-Clustern



In einem nächsten Schritt wird für jedes Cluster ein „Positions-Schwerpunkt“ berechnet, der als Mittelwert aller Einzelpositionen anzusehen ist.

$$\bar{P}_{i,x} = \frac{\sum_{j=1}^n p_{i,x}(j)}{n_i}$$

Gleichung 3-35

$$\bar{P}_{i,y} = \frac{\sum_{j=1}^n p_{i,y}(j)}{n_i}$$

Gleichung 3-36

mit:

$\bar{P}_{i,x}$	= X-Koordinate des Cluster-Schwerpunktes im Cluster i	[m]
$\bar{P}_{i,y}$	= Y-Koordinate des Cluster-Schwerpunktes im Cluster i	[m]
$p_{i,x}(j)$	= X-Koordinate des Punktes j im Cluster i	[m]
$p_{i,y}(j)$	= Y-Koordinate des Punktes j im Cluster i	[m]
n_i	= Anzahl der Punkte im Cluster i	[-]

BILD 3-33 zeigt das Ergebnis der Clusterbildung und der Berechnung der Cluster-Mittelpunkte aus mehreren Fußgängerspuren, die in Darmstadt aufgezeichnet wurden.

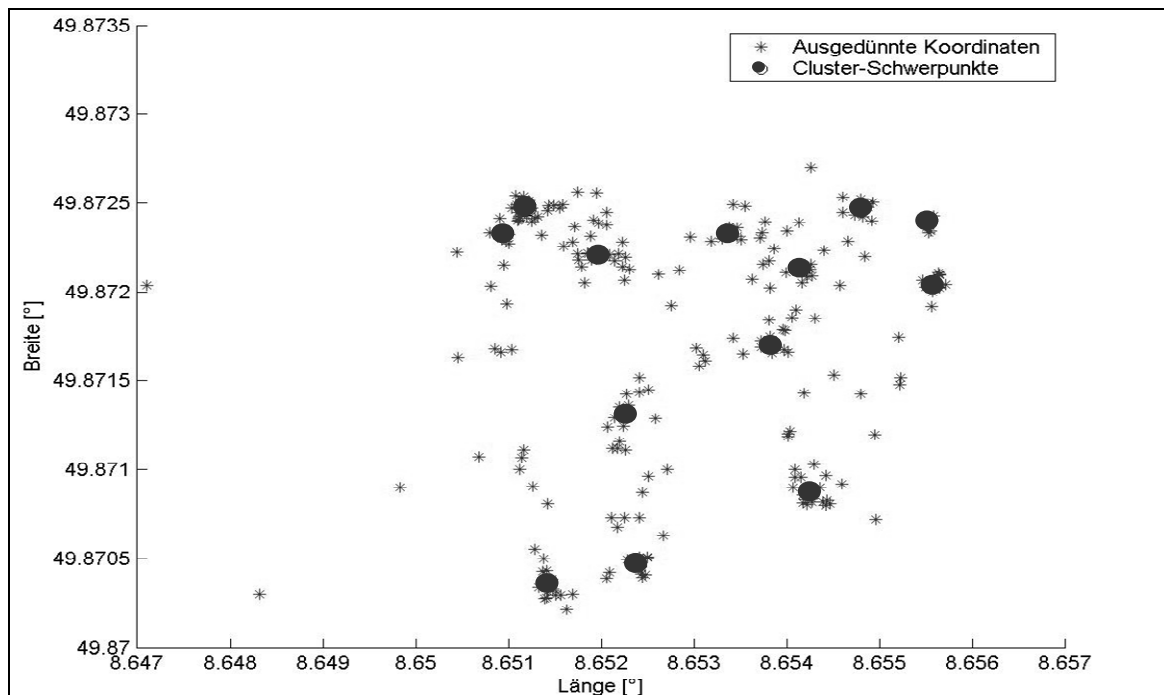


Bild 3-34: Ergebnis der Berechnung von Schwerpunkten von Einzel-Clustern

Konnektivitäten zwischen Einzel-Clustern

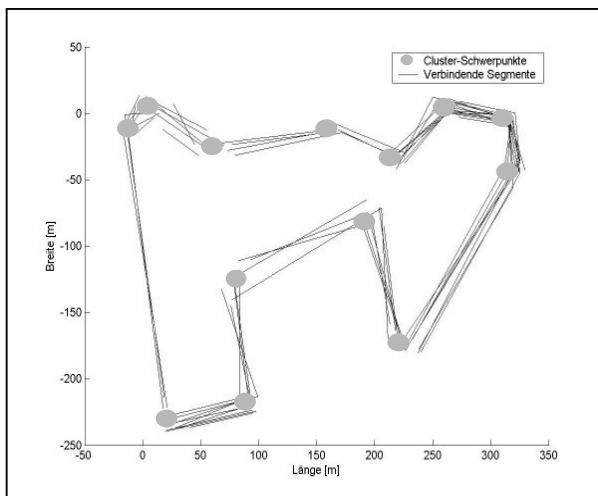


Bild 3-35: Konnektivitäten zwischen Einzel-Clustern

In einem letzten Schritt ist zu überprüfen, ob zwischen den Einzel-Clustern gültige Verbindungen vorhanden sind. Hierzu wird von jedem Einzelpunkt in einem Start-Cluster eine Verbindungslinie zum nächsten Punkt der ursprünglichen Bewegungspur erstellt. Dieser zweite Punkt befindet sich in einem anderen Cluster (Ziel-Cluster). Die Verbindungslinien eines Start-Clusters müssen immer in demselben Ziel-Cluster enden. Die neuen Datenbankelemente werden abschließend aus den Verbindungen der Einzelschwerpunkte der Cluster gefunden.

4 Praxistest

4.1 Einführung

Ein Großteil der zuvor beschriebenen FTD-Verfahren

- auf mobilen Endgeräten,
- im Motorisierter Individualverkehr,
- im Öffentlichen Verkehr und
- für Fußgänger und Radfahrer

wurden im Projekt COX durch die T-Systems GEI in Ulm und das ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme in Darmstadt umgesetzt. Als mobiles Endgerät wurde ein MDA II mit dem Betriebssystem Microsoft Windows Mobile 2003 eingesetzt. Die Ortung wurde unter Verwendung von handtypischen Sensoren (Bluetooth, WLAN, GSM und GPS) durchgeführt. Eine vom ZIV entwickelte Ortungskomponente führt eine Fusion der von Ortungssensoren ermittelten Positionsdaten durch, die an die FTD-Komponenten auf dem mobilen Endgerät weitergeleitet werden. Die entwickelten Verfahren wurden von November 2004 bis Februar 2005 einem Praxistest unterzogen, deren Ergebnisse nachfolgend dargestellt werden. In der nachfolgenden Tabelle sind die jeweiligen Messungen dokumentiert:



Art der Erhebung	Zeitraum	Bemerkung
Für FTD-Verfahren: Motorisierter Individualverkehr		
Lokale Messung: Verkehrszählung an sechs Messquerschnitten	10./11./12.5.2004, jeweils von 6:30 bis 9:30 Uhr	Mit insgesamt 10 Personen wurde das Verkehrsaufkommen auf der Rheinstraße (B26) in Darmstadt erhoben. Ziel der Erhebung war es, das tatsächliche Verkehrsaufkommen den Detektorwerten an LSA gegenüberzustellen. Die Daten wurden auch zur Kalibrierung der mikroskopischen Simulation genutzt.
Messfahrten im Pkw zur Aufnahme der Geschwindigkeitsniveaus auf mehreren Testabschnitten	10./11./12.5.2004, jeweils von 6:30 bis 9:30 Uhr 8./9./10.12.2004, jeweils von 8:30 bis 13:00 Uhr	Ein Pkw wurde mit der mobilen COX-Erfassungseinheit ausgestattet. Neben den Positionsdaten wurden durch Auswertungen der mittleren momentanen Geschwindigkeit in einzelnen Straßensegmenten berechnet. Die Streckenabschnitte wurden 103 Mal befahren. Ziel der Fahrten war es, einen umfassenden Datenbestand aufzubauen, um daraus Referenzganglinien der Geschwindigkeiten zu erzeugen.

Art der Erhebung	Zeitraum	Bemerkung
Einzelmessfahrten im Pkw zum Test der entwickelten Verfahren	27.10.2004, 10/16/17.12.2004, 13/14.01.2005	Ein Pkw wurde mit GPS-Empfänger und mobilem Endgerät ausgestattet. Auf dem Gerät wurde die FTD-Software installiert. Zentralenseitig waren die FTD-Module aktiv. Ziel der Fahrten war es, die entwickelten FTD-Verfahren zu testen.
Für FTD-Verfahren: Öffentlicher Verkehr		
Messfahrten in der Straßenbahn zur Aufnahme des Fahrtablaufs	04.03.2004 10.11.2004 14.01.2005 21.04.2005	Zum Test der FTD-Verfahren wurden Fahrten in der Straßenbahnlinie 9 in Darmstadt durchgeführt. Ausstattung: Mobiltelefon, GPS-Empfänger, FTD-Software.
Für FTD-Verfahren: Fußgänger und Radfahrer		
Messläufe auf vorgegebener Strecke	12.06.2004	Zur Sammlung von Fußgängerdaten wurde ein Testabschnitt in Darmstadt insgesamt 23-mal abgelaufen. Die Daten wurden für die Verfahrensentwicklung und Tests genutzt. Ausstattung: Computer, GPS-Empfänger, Erfassungssoftware.

Tabelle 4-1: Durchgeführte Erhebungen zur Entwicklungen der FTD-Verfahren

Eine Dokumentation der Erhebungen ist in der **Anlage 9.7.4** beigelegt.

4.2 Verfahren auf mobilen Endgeräten

4.2.1 Positionsbestimmung

Das Ortungsmodul liefert in 1-Sekunden-Abständen aktuelle Positionsdaten. Die Informationen werden aus einer Fusion der vier handytypischen Ortungssensoren Bluetooth, WLAN, GSM und GPS ermittelt. Bei freier Sicht auf den Himmel wird in der Regel das GPS-Signal verwendet, da hiermit relativ gute Positionsdaten ermittelt werden. Teilweise können die Verfügbarkeit und die Genauigkeit des GPS-Signals eingeschränkt sein. Vor allem wenn der GPS-Empfänger durch Metallteile (z.B. Autodach, innerhalb von Bussen und Bahnen) verdeckt ist, können Fehler auftreten. Es ist daher zu empfehlen, dass der GPS-Empfänger so gelagert wird, dass die Sicht auf den Himmel jederzeit vorhanden ist. Im Pkw ist der Empfänger beispielsweise unterhalb der Windschutzscheibe zu lagern. In Bussen und Bahnen sollte eine Position nahe den Fenstern eingenommen werden. Darüber hinaus entwickelt die T-Systems derzeit ein Verfahren, bei dem die Ortung von UMTS verbessert wird, so dass die Ortung ohne freie Sicht auf Satelliten verbessert wird. Durch die Nutzung weiterer Ortungssensoren (vgl. **Anlage 9.8**) kann die Ortung deutlich verbessert werden.

4.2.2 Datenreduktion Bewegungsspur

Motorisierter Individualverkehr, Fußgänger, Radfahrer

Die Kommunikation zwischen dem mobilen Endgerät und der Zentrale verursacht Kosten, die es zu minimieren gilt. Daher wurde ein Verfahren zu Reduktion der Bewegungsspuren auf ein erforderliches Minimum entwickelt, bei dem die Geometrie des zurückgelegten Weges erhalten bleibt und signifikante Geschwindigkeitsänderungen erfasst werden. Dabei wird im Endgerät die Bewegungsspur regelmäßig analysiert. Es werden Positionspunkte immer dann für die weitere Verwendung gespeichert, wenn die folgenden Kriterien erfüllt sind:

- Abweichung einer Position von einer gedachten Verbindungslinie zwischen vorherigen Punkten und Folgepunkt von 5 Metern.
- Innerhalb der letzten 5 Minuten wurde keine Position gespeichert.
- Distanz zwischen letztem Punkt und aktueller Position größer 500 Meter.
- Die Geschwindigkeitsänderung in einem aktuell befahrenen Streckenabschnitt ist größer 30% zum vorhergehenden Streckenabschnitt.

Die einzelnen Kriterien können am mobilen Endgerät verändert werden. Jedoch haben sich diese Parameterpaare als geeignet herausgestellt. Immer dann, wenn ein neuer ausgedünnter Positionspunkt gefunden wird, wird ein Übertragungsimpuls an die COX-Zentrale ausgelöst. In der Zentrale wird die ausgedünnte Bewegungsspur dann regelmäßig analysiert. Das entwickelte Verfahren kommt im Motorisierten Individualverkehr, für Fußgänger und Radfahrer zum Einsatz.

Ein Praxisbeispiel einer Spurausdünnung einer Testfahrt in Darmstadt zeigt **Bild 4-1**.

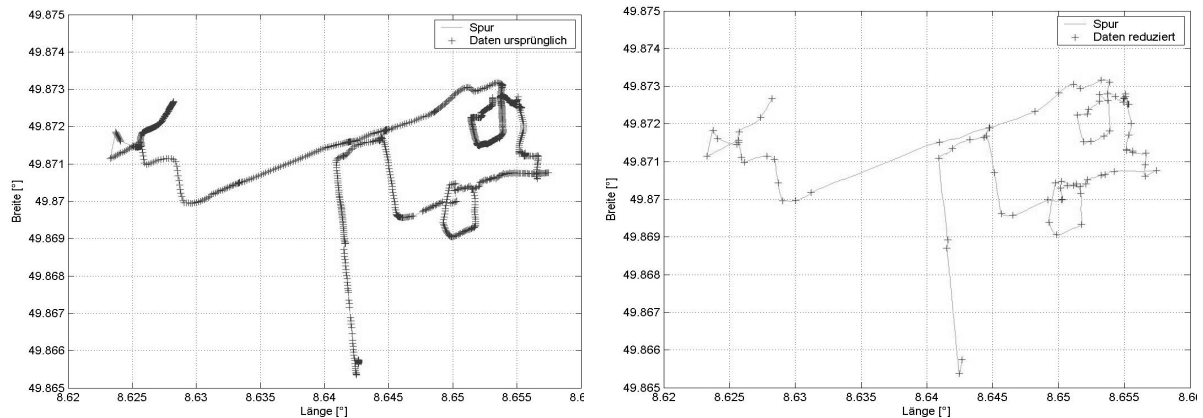


Bild 4-1: Reduktion von Bewegungsdaten im Motorisierten Individualverkehr (links: nicht reduzierte Spur mit 1326 Datensätzen; rechts: reduzierte Spur mit 88 Datensätzen)

Durch das Verfahren konnte eine Datenreduktion in dem in **Bild 4-1** gezeigten Beispiel um ca. 93 % erzielt werden. Dabei wird der Spur-Verlauf exakt beschrieben. Dieses sehr gute Resultat trägt zu einer deutlichen Einsparung der Telekommunikationskosten bei.

Weiteres Entwicklungspotenzial

Der FTD-Spurausdünnungsprozess liefert gute Resultate und bedarf keiner weiteren Änderungen.

Öffentlicher Verkehr

Bei dem entwickelten Verfahren werden alle Positionsdaten aus der Bewegungsspur gelöscht, wenn sich das Fahrzeug in Bewegung befindet. Es werden regelmäßig räumliche Analysen durchgeführt. Treten längere Standzeiten größer 15 Sekunden auf, werden ausschließlich 3 Positionsdaten mit den folgenden Informationen an die Zentrale übertragen:

1. Punkt: Ankunftszeit an der Haltestelle,
2. Punkt: Halteposition,
3. Punkt: Abfahrtszeit an der Haltestelle.

In der Zentrale wird dann überprüft, ob der Halt tatsächlich an einer Haltestelle stattgefunden hat. Es ist auch möglich, dass ein außerplanmäßiger Halt, z.B. an einer Lichtsignalanlage, zu einer Fahrtverzögerung geführt hat. In diesem Fall sind keine weiteren zentralenseitigen Auswertungen durchzuführen.

Ein Beispiel einer Testfahrt mit der Straßenbahnlinie 9 in Darmstadt zeigt **Bild 4-2**. Deutlich ist zu erkennen, dass ausschließlich an Positionen mit Haltezeiten > 15 Sekunden Positionspunkte gespeichert werden. Bei sehr gut beschleunigten ÖPNV-Linien halten die Fahrzeuge ausschließlich an Haltestellen und nicht mehr auf freier Strecke. Die Bewegungsspuren werden dann ganz erheblich reduziert. In unserem Beispiel wurde das Datenvolumen um

97% reduziert, was als gutes Resultat zu bewerten ist. Die Haltepositionen werden dabei sicher erkannt und an die Zentrale übertragen.



Bild 4-2: Ausgedünnte Bewegungsspur, Öffentlicher Verkehr (Linie 9, Darmstadt)

Weiteres Entwicklungspotenzial

Der FTD-Spurausdünnungsprozess liefert gute Resultate und bedarf keiner weiteren Änderungen.

4.2.3 Übertragungsimpuls und Kommunikation

Immer dann, wenn eine Position ermittelt wird, die aus der Spurausdünnung resultiert, wird das Ergebnis vom mobilen Endgerät an die Zentrale übertragen. In der Regel wird hierzu das GPRS-Netz verwendet. Während des Feldversuchs wurde die Dauer der Datenübertragung vom Auslösen des Übertragungsimpulses bis zur Verarbeitung in der Zentrale ermittelt. Hierzu wurden im ÖPNV-FTD-Modus an zwei Haltestellen Zeitmessungen durchgeführt, bei denen drei Zeitpunkte erhoben wurden:

1. Ankunft des Fahrzeugs an einer Haltestelle (Fahrzeug steht).
2. Abfahrt des Fahrzeugs von einer Haltestelle.
3. Eintreffen der Daten in der Zentrale.

Die Abfahrtszeiten wurden durch telefonischen Kontakt mit dem Erfasser in der Zentrale notiert. Gleichzeitig wurde der Eingang der Daten in der Zentrale beobachtet. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 4-2** zusammengefasst:

HS-Nr.	Linie	Start-Haltestelle	Ankunft an Haltestelle	Abfahrt an Haltestelle	Daten-ankunft Zentrale	Übertragungszeit von Abfahrt
1	Strab 9	Darmstadt, Feldbergstr.	17:11:03	17:11:23	17:11:34	11 Sek.
2	Strab 9	Darmstadt, Hbf	17:12:59	17:13:26	17:13:41	15 Sek.

Tabelle 4-2: Darstellung der Übertragungszeiten zwischen Endgerät und Zentrale

Die Überprüfung hat ergeben, dass das Zeitintervall von der Abfahrt bis zur Verarbeitung in der Zentrale mit max. 15 Sekunden sehr gering ist. Im Motorisierten Individualverkehr und für Fußgänger und Radfahrer sind ähnlich kurze Übertragungszeiten zu erwarten. Allerdings ist hier die Überprüfung nur schwer möglich da nicht zu erkennen ist, zu welchem Zeitpunkt ein Übertragungsimpuls erzeugt wird.

4.3 Verkehrslage – Motorisierter Individualverkehr

4.3.1 Testgebiet

Die FTD-Methodik im Motorisierten Individualverkehr wurde auf einem etwa 7 Kilometer langen Streckenabschnitt in Darmstadt getestet. In diesem Bereich befinden sich 12 Lichtsignalanlagen, wovon 11 Anlagen Online-Daten der Detektoren an die Zentrale übertragen. Eine Übersicht des Testgebiets zeigt **Bild 4-3**.

4.3.2 Aufbau einer Referenzdatenbasis aus Detektoren

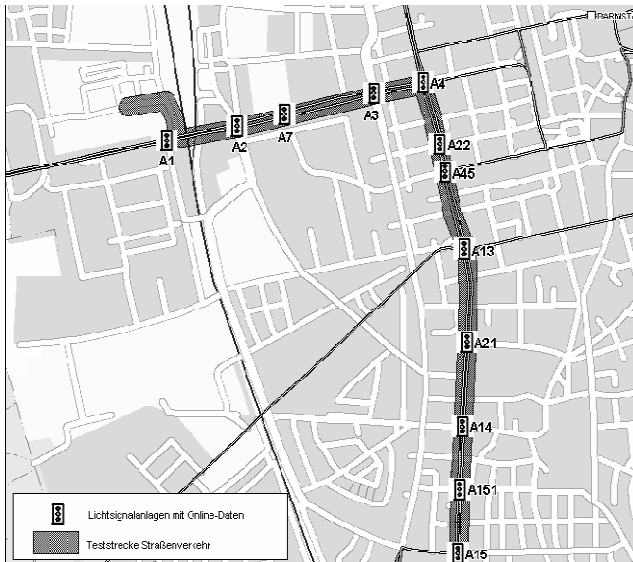


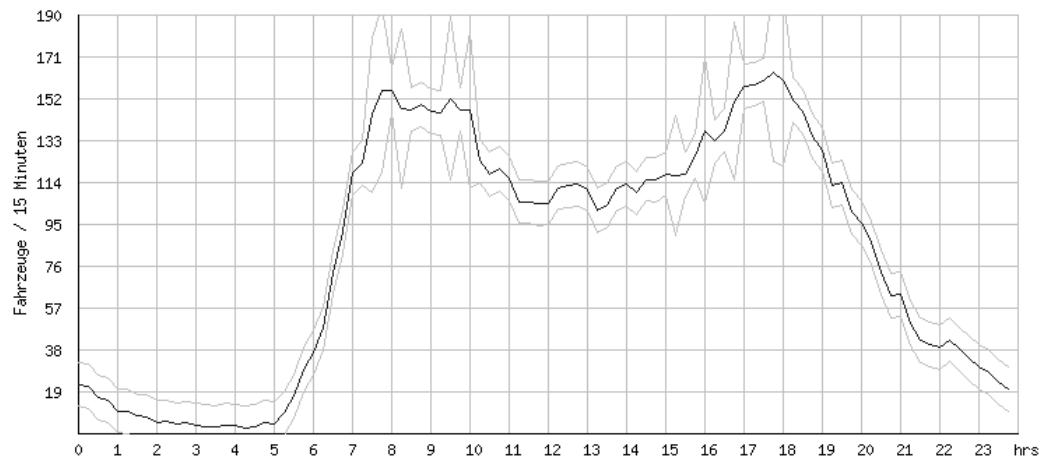
Bild 4-3: Testgebiet FTD- motorisierter Individualverkehr in Darmstadt

Ziel des FTD-Verfahrens ist es, aus den Detektordaten typische Tagesganglinien zu erzeugen, um diese später im Online-Betrieb mit den Ganglinien mobil erhobener Daten vergleichen zu können. Derzeit werden von ca. 620 Detektoren im 15 Minuten-Intervall die Daten an die Zentrale übertragen. Die Anbindung des Verkehrsrechners der Stadt Darmstadt an die Zentrale wurde im Mai 2004 realisiert, so dass eine große Datenbasis zur Referenzbildung vorliegt. Bei der Berechnung wird eine Unterscheidung für die jeweiligen Wochentage vorgenommen, da das Verkehrsaufkommen an den jeweiligen Wochentagen unterschiedlich verteilt ist. Ein Beispiel der Referenzdatenbildung für einen Montag zeigt **Bild 4-4**.

Seit Aufzeichnungsbeginn wurden 27 Montage durch das Verfahren analysiert. 24 Tagesganglinien wurden zur Referenzbildung herangezogen. 3 Ganglinien wurden auf Grund zu großer Abweichungen bzw. Messwerteausfälle verworfen.

LSA:	A 2
Detektor:	D 42
Abstand zur Haltelinie in m:	31
Ort:	Rheinstraße / Berliner Allee
Wochentag:	Montag
Anzahl erfasster Ganglinien:	27
Anzahl übernommener Ganglinien:	23
Letzter Stand:	20.12.2004

Referenzganglinie der Zählwerte

[exportieren](#)


Fusion aller Detektoren (D41, D42, D43) der westlichen Zufahrt

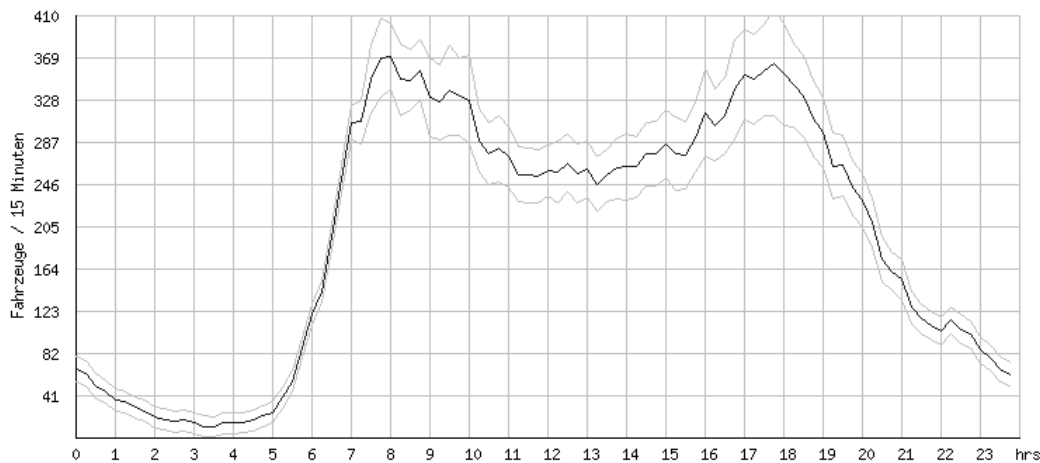


Bild 4-4: Detektorreferenz für einen Montag mit Standardabweichung

Die in **Bild 4-4** dargestellte Referenzganglinie zeigt im oberen Bereich das detektierte Verkehrsaufkommen an einem Detektor der westlichen Zufahrt des Knotenpunkts Rheinstraße / Berliner Allee in Darmstadt. Besonders ausgeprägt ist die morgendliche und nachmittägliche Verkehrsspitze. Neben dem eigentlichen Verkehrsaufkommen ist die Standardabweichung (Mittelwert + Standardabweichung bzw. Mittelwert – Standardabweichung) eingezeichnet. Aus dem relativ konstanten Verlauf der Standardabweichung während der Schwachverkehrszeiten ist auf einen gleichmäßigen Verlauf des Verkehrsaufkommens zu schließen. In

den Spitzenstunden hingegen kommt es verteilt auf die erfassten Montage zu unterschiedlich starkem Verkehrsaufkommen, was aus den größeren Standardabweichungen abzuleiten ist.

Im unteren Bereich von **Bild 4-4** ist die Fusion aller Detektoren einer Zufahrt als Referenzganglinie dargestellt. Die Fusion wird durchgeführt, weil der spätere Online-Vergleich der mobil erhobenen Daten immer mit den fusionierten Detektordaten durchgeführt wird.

Bewertung

Die Referenzdatenbildung beruht auf einer Korrelationsrechnung. Jeweils am Ende eines Tages wird geprüft, ob die aktuelle Tagesganglinie in die Referenz mit aufgenommen werden darf. Werden die geforderten Kriterien nicht erfüllt, so wird die Ganglinie verworfen. Die Beobachtungen der Referenzbildung haben gezeigt, dass das Verfahren recht zuverlässig neue Ganglinien aufnimmt, wenn der Verlauf plausibel erscheint. Dabei können durchaus größere Schwankungen im Verkehrsaufkommen auftreten (z.B. geringeres Verkehrsaufkommen in den Ferien), ohne dass die Ganglinie verworfen wird. Wirklich untypische Ganglinien (z.B. bei großen Störungen oder Baustellen) werden nicht in die Referenz mit aufgenommen. Beispiele hierfür sind in **Anlage 9.7.3** dargestellt.

Weiteres Entwicklungspotenzial

Bislang wird eine Unterscheidung der Ganglinien in die jeweiligen Wochentage vorgenommen. Eine gesonderte Berücksichtigung von Ferien, Feiertagen oder Großveranstaltungen findet bislang nicht statt, was durchaus eine sinnvolle Ergänzung ist.

4.3.3 Zuordnung von Bewegungsspuren zu Datenmodellen (MapMatching)

Die vom Verkehrsteilnehmer befahrenen Streckenabschnitte werden durch die Aufzeichnung und Übertragung der Bewegungsspuren vom mobilen Endgerät erhoben. Die in der COX-Zentrale eintreffenden Bewegungsspuren werden gespeichert. Aus ihnen allein können jedoch noch keine Rückschlüsse auf die in den einzelnen Streckenabschnitten gefahrenen Geschwindigkeiten gezogen werden. Hierzu muss zunächst die Bewegungsspur durch ein so genanntes MapMatching-Verfahren einzelnen Streckenabschnitten (Kanten), die durch ein Knoten-Kanten-Modell in Datenbanken hinterlegt sind, zugeordnet werden.

Die in der Zentrale zu verarbeitenden ausgedünnten Bewegungsspuren werden vor dem MapMatching wieder mit Zwischenpunkten aufgefüllt, damit der „MapMatcher“ mit ausreichenden Daten versorgt wird. Vom MapMatcher werden dann die befahrenen Strecken mit ihrer Nummer und der gefahrenen Geschwindigkeit zurückgegeben. Aus diesen Werten erfolgt dann die weitere Bearbeitung mit den FTD-Verfahren für den Motorisierten Individualverkehr.

Bewertung

Bild 4-5 zeigt das Ergebnis einer Testfahrt in Darmstadt. Darin sind die unausgedünnten Bewegungsspuren und die zentralenseitig erkannten Streckenabschnitte farblich hinterlegt. Die unterschiedlichen Farbgebungen repräsentieren verschiedene gefahrene Geschwindigkeiten. Ein Vergleich der tatsächlichen gefahrenen Geschwindigkeiten (Positionspunkte) mit den Errechneten zeigt, dass der MapMatching Prozess korrekte Ergebnisse liefert.

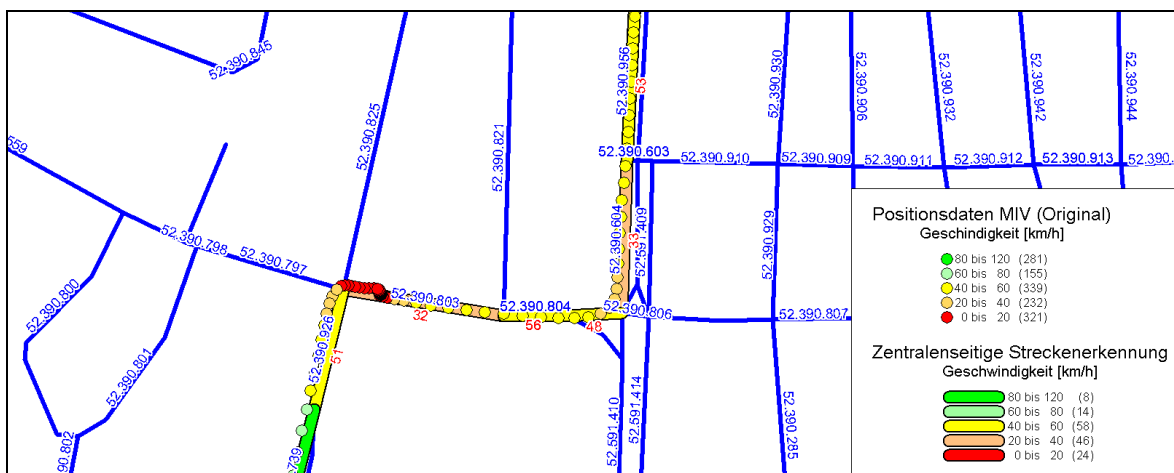


Bild 4-5: Beispiel eines Ergebnisses des MapMatchings

Eine detaillierte Betrachtung kommt zu dem Ergebnis, dass die befahrenen Streckenabschnitte richtig erkannt wurden. Treten Fehler in den Positionsdaten auf (z.B. aus GPS-Messfehlern) kann natürlich auch kein korrektes MapMatching erfolgen.

Weiteres Entwicklungspotenzial

Das MapMatching-Verfahren erfordert keine weiteren Ergänzungen bzw. Optimierungen.

4.3.4 Aufbau einer Referenzdatenbasis aus mobil erhobenen Daten

Die Kernaufgabe des FTD-Verfahrens im Motorisierten Individualverkehr ist es, aus den in der Zentrale berechneten und auf Plausibilität geprüften Geschwindigkeiten mobiler Endgeräte fortdauernd eine Referenzdatenbasis aufzubauen. In dieser Referenzdatenbasis ist für jedes Streckenelement der Straßendatenbank eine Geschwindigkeitsganglinie hinterlegt aus der abzuleiten ist, wie schnell man zur jeweiligen Tageszeit auf dem Abschnitt fahren kann. Zur Überprüfung der entwickelten Methodik wurden eine Vielzahl von Testfahrten durchgeführt. Die eigentliche Referenzdatenbasis wurde an folgenden Tagen erhoben:

1. Montag 10. Mai 2004; 6:30 bis 10:00 Uhr
2. Dienstag 11. Mai 2004; 6:30 bis 10:00 Uhr
3. Mittwoch 12. Mai 2004; 6:30 bis 10:00 Uhr
4. Mittwoch 8. Dezember 2004; 8:30 bis 13:00 Uhr
5. Donnerstag, 9. Dezember 2004; 8:30 bis 13:00 Uhr
6. Freitag, 10. Dezember 2004; 8:30 bis 13:00 Uhr

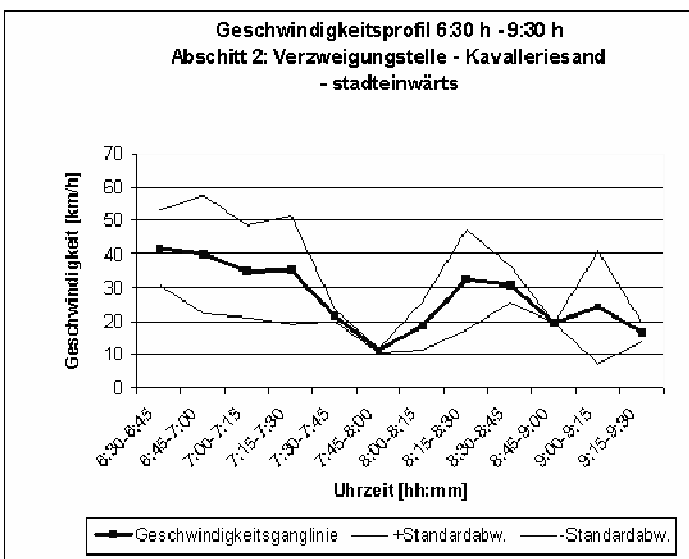


Bild 4-6: Referenzganglinie der Geschwindigkeiten

Zeitintervall zwischen 7:30 Uhr und 8:15 Uhr deutlich, in dem die mittlere momentane Geschwindigkeit auf bis zu 10 km/h absinkt. Die Standardabweichung ist sehr gering was darauf hinweist, dass alle Fahrzeuge in diesem Zeitintervall vom zähflüssigen Verkehr betroffen sind. Ähnlich wie im dargestellten Beispiel werden für alle Links automatisch Referenzganglinien der momentanen Geschwindigkeiten erzeugt.

Ein Beispiel einer Referenzganglinie der Geschwindigkeiten zeigt **Bild 4-6**. Es handelt sich hierbei um einen Streckenabschnitt auf der Rheinstraße in Darmstadt, der die Verbindung zwischen der Innenstadt und den westlich gelegenen Autobahnen darstellt. Vor allem in der morgendlichen Spitzenstunde kommt es in dem betrachteten Abschnitt immer wieder zu Rückstaus von mehreren hundert Metern vor einer Lichtsignalanlage, da das Verkehrsaufkommen außerordentlich groß ist. In **Bild 4-6** wird dieser Effekt im

4.3.5 Plausibilitätsprüfung online erhobener Geschwindigkeitswerte durch Fusion stationär und mobil erhobener Daten

Die Bewegungsdaten mobiler Endgeräte besitzen bei einer ausreichend großen Verbreitung eine hohe Aussagekraft über das aktuelle Verkehrslagebild im Motorisierten Individualverkehr. Ein einzelnes Erfassungsgerät besitzt allerdings eine geringe Aussagekraft. Bei einem deutlichen Abweichen der aktuellen Geschwindigkeit von der Geschwindigkeitsreferenz ist die Ursache zunächst unbekannt. Ursachen können Staus sein, die dann anderen Verkehrsteilnehmern mitzuteilen sind. Andererseits können die Einzelpersonen sehr langsam gefahren (z.B. zur Wegorientierung). Letztere Situation ist sicherlich keine Verkehrsstörung, die im Verkehrslagebild zu berücksichtigen ist. Somit sind Einzelmesswerte mobiler Endgeräte zunächst grundsätzlich als nicht repräsentativ anzusehen, solange die Korrektheit durch weitere Datenanalysen nachgewiesen wurde.

Die Vorgehensweise bei der Überprüfung der mobil erhobenen Daten stellt sich wie folgt dar:

1. Ermittlung des FTD-Bewertungskennwertes (vgl. **Tabelle 3-8**)
2. Ist der Bewertungskennwert > 1 (es liegt nur ein Geschwindigkeitswert in einem Abschnitt vor oder es treten starke Streuungen der Messwerte auf), muss eine genauere Analyse durch eine Fusion mobil erhobener Daten mit Detektordaten durchgeführt werden.
3. Abschließende Beurteilung der Verkehrslage.

Bei der Fusion werden regelmäßig Vergleiche der Online-Werte, sowohl mobiler Daten als auch der Detektordaten durchgeführt. Um diese Vorgehensweise zu überprüfen, wurden weitere Testfahrten durchgeführt, bei denen zunächst eine ganz normale Fahrt und anschließend eine Staufahrt erfolgten. Bei der Staufahrt wurde an einigen Stellen absichtlich für einen längeren Zeitraum angehalten, was einen Stau simulieren sollte. Da die Erfassung immer nur mit einem Messgerät erfolgte, musste eine Sensorfusion durchgeführt werden. Das Ergebnis dieser Tests wird nachfolgend dargestellt.

Streckenabschnitte ohne Detektoren als Vergleichsgrößen

Bild 4-7 zeigt einen Streckenabschnitt (Link), für den eine Geschwindigkeitsreferenz aus mehreren Einzelmessfahrten erzeugt wurde. Aus zwei Einzelmessfahrten (Normalfahrt und Staufahrt) werden die in der Zentrale ermittelten Online-Geschwindigkeiten der Referenzganglinie gegenübergestellt. Für beide Fahrten gilt ein FTD-Bewertungskennwert von 3 (sehr schlecht), da die Daten nur als Einzelereignis vorliegen und somit nicht repräsentativ sind.

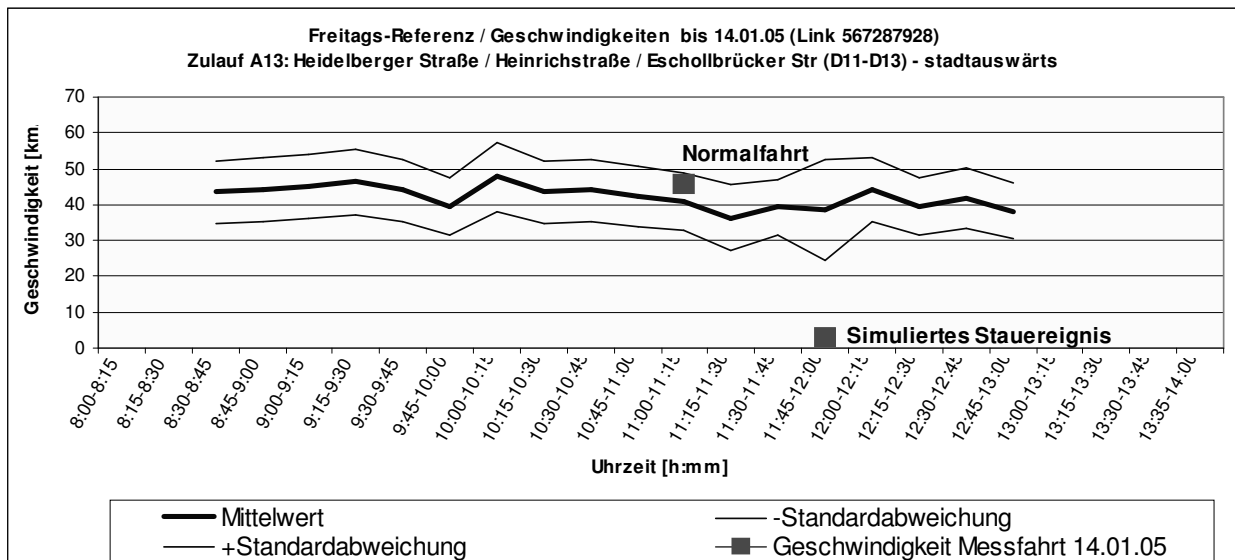


Bild 4-7: Gegenüberstellung der Referenzganglinien der Geschwindigkeiten eines Streckenabschnitts in Darmstadt mit zwei Einzelfahrten (Normalfahrt, Staufahrt) – ohne Detektorreferenz

Die Geschwindigkeit der Normalfahrt im Zeitintervall zwischen 11.00 Uhr bis 11.15 Uhr liegt innerhalb des Vertrauensbereichs der Referenzganglinie. Die Geschwindigkeit ist als plausibel anzusehen. Die in Datenbanken hinterlegte Geschwindigkeit in dem Streckenabschnitt wird daher durch den aktuellen Wert angepasst.

Bei der simulierten Staufahrt wurde für ca. 90 Sekunden in dem Streckenabschnitt angehalten. Hierdurch reduzierte sich die gefahrene momentane Geschwindigkeit auf etwa 4 km/h. Da dieser Messwert außerhalb des Vertrauensbereichs der Referenzganglinie lag und auch keine Detektorwerte zur weiteren Überprüfung herangezogen werden konnten, wurde dieses Einzelereignis verworfen. Es standen somit keine Online-Daten in diesem Zeitintervall zu Verfügung. Dennoch kann eine plausible Geschwindigkeitsangabe für diesen Streckenabschnitt gegeben werden. Hierzu wird die Referenzgeschwindigkeit an Routingdienste weitergegeben.

Streckenabschnitte mit Detektoren als Vergleichsgrößen

An einem weiteren Streckenabschnitt können die ermittelten Geschwindigkeiten zusätzlich mit Detektordaten auf ihre Plausibilität hin überprüft werden (vgl. **Bild 4-8**, **Bild 4-9**). Da die Geschwindigkeit der ungestörten Fahrt erneut innerhalb des Vertrauensbereichs der Geschwindigkeitganglinie liegt, wird der ermittelte Einzelmesswert als plausibel angesehen. Anders verhält es sich dagegen mit der simulierten Staufahrt. Das Messereignis im Zeitintervall zwischen 11:45 Uhr und 12:00 Uhr liegt außerhalb des Vertrauensbereichs und wird somit zunächst als nicht vertrauenswürdig angesehen (FTD-Bewertungskennwert = 3). Eine zusätzliche Überprüfung wird durch den Vergleich der Online-Detektorwerte mit der Detektorreferenz ermöglicht (vgl. **Bild 4-9**). Die Zählwerte der Detektoren befinden sich allerdings innerhalb des Vertrauensbereichs, so dass keine Störungen aus den Detektorzählwerten abgeleitet werden kann. Somit ist die ermittelte Geschwindigkeit zu verwerfen.

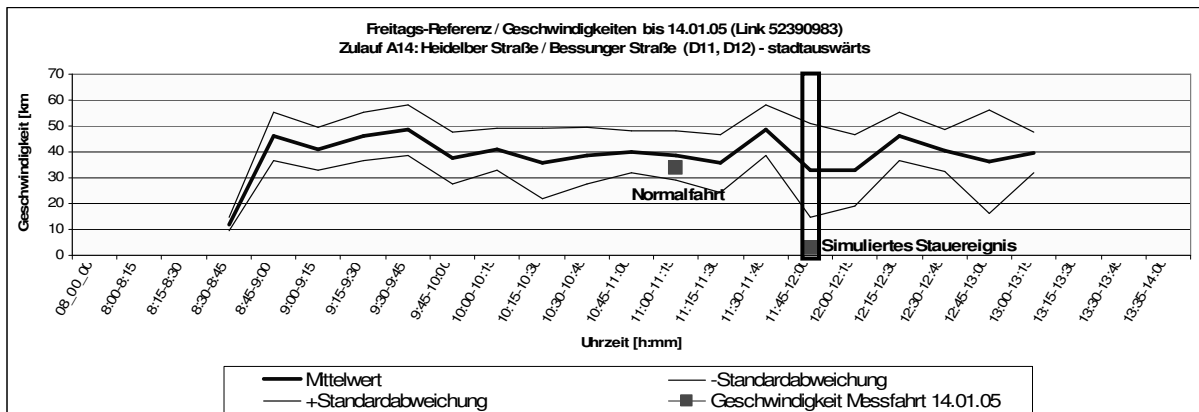


Bild 4-8: Gegenüberstellung der Referenzganglinien der Geschwindigkeiten eines Streckenabschnitts in Darmstadt mit zwei Einzelfahrten (Normalfahrt, Staufahrt) – mit Detektorreferenz

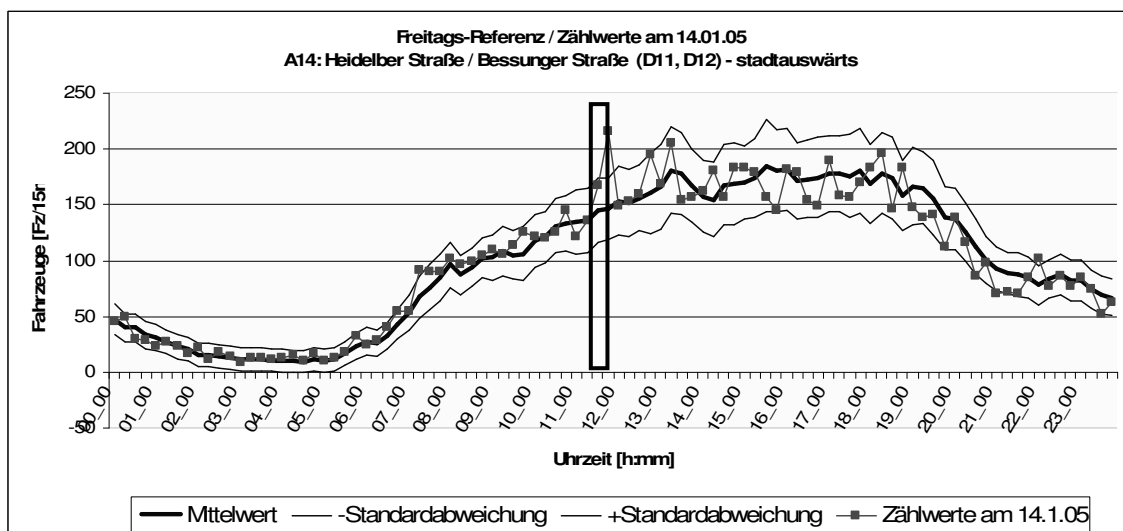


Bild 4-9: Fusionierte Detektorganglinie und Detektorreferenz einer LSA-Zufahrt

Im Zeitintervall zwischen 12:00 Uhr und 12:15 Uhr zeigt die Detektorganglinie eine deutliche Abweichung gegenüber der Referenz mit einem größeren Verkehrsaufkommen (ca. 50 Fahrzeuge mehr im 15 Minuten-Intervall). Wäre die Messfahrt mit dem Stauereignis in diesem Zeitintervall durchgeführt worden, so hätte die Sensorfusion den ermittelten Geschwindigkeitswert als plausibel angesehen.

Zusammenfassende Betrachtung der Testfahrten

Am 14. Januar 2005 wurden Testfahrten mit insgesamt vier mobilen Endgeräten im Straßennetz durchgeführt. Das Verfahren der „Floating Traveller Data (FTD)“ wurde für jeden befahrenen Streckenabschnitt (Link) analysiert und bewertet. Dazu wurden ausgewählte Streckenabschnitte detailliert betrachtet. Abschließend wurde eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung des FTD-Verfahrens an Hand aller Ergebnisse der befahrenen Streckenabschnitte durchgeführt. Eine vollständige Beschreibung der Ergebnisse ist in **Anlage 9.7.4** beigefügt.

Folgende Einzelfahrten wurden am 14. Januar durchgeführt, bei denen die FTD-Verfahren im Online-Betrieb erprobt wurden.

- 1. Fahrt, 14.01.2005; 11.00 – 11.15 Uhr; normale Befahrung mit vier Endgeräten
- 2. Fahrt, 14.01.2005; 11.45 – 12.00 Uhr; Staufahrt mit einem Endgerät
- 3. Fahrt, 14.01.2005; 12.45 – 13.00 Uhr; Staufahrt mit einem Endgerät

An einigen Stellen im Straßennetz wurde für ca. 90 Sekunden angehalten. Durch dieses Verhalten sollte eine Stausituation simuliert werden. Da allerdings nur ein Endgerät im Einsatz war, ist die Plausibilität der Einzelereignisse in Frage zu stellen. Daher sollte das zentralenseitige FTD-Verfahren zur Plausibilitätsprüfung einen Vergleich mit den Detektorwerten durchführen.

Exemplarisch ist in **Tabelle 4-3** das Resultat der 2. Testfahrt zusammengefasst.

LSA	Link-ID	2. Fahrt, 14.01 - 11:45-12:00 Uhr (1 Endgerät)					Interpretation				
		Uhrzeit	Anzahl Endgeräte	Geschwindigkeit	Stabw.	FTD-B.-Kennwert	V-FTD innerhalb Toleranz?	Fusion erforderlich?	Zahlwerte Detektoren innerhalb Toleranz?	V-FTD plausibel?	Resultat korrekt?
[-]	[-]	[HH:MM:SS]	[-]	[km/h]	[km/h]	[-]					
	52591377	11:48:33	1	5,2	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52392191	11:48:35	1	27,0	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A22	52390982	11:48:48	1	31,3	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A45	52390981	11:49:06	1	24,4	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52433008	11:49:17	1	34,4	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52390980	11:49:23	1	46,2	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	567287928	11:51:47	1	2,7	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	567287927	11:51:49	1	18,0	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A13	52390979	11:52:48	1	2,5	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52390977	11:52:58	1	47,2	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52434145	11:53:07	1	53,2	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A21	52390970	11:53:17	1	53,7	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52390788	11:53:28	1	49,1	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52390968	11:53:36	1	46,4	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A14	52390983	11:56:04	1	2,9	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52390966	11:56:18	1	36,0	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A151	52390961	11:56:31	1	38,2	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52390956	11:58:58	1	3,4	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
vor A15	52390604	11:59:14	1	29,5	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja

Tabelle 4-3: Zusammenfassende Darstellung der FTD-Verfahrensbewertung; Testfahrt 14.01.2005; 11.45 – 12.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät

Insgesamt wurden 19 Streckenabschnitte befahren. Da nur ein Geschwindigkeits-Messwert pro Streckenabschnitt vorlag, ist das Ergebnis einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen. Der FTD-Bewertungskennwert nimmt überall einen Wert von „3“ an (auf Plausibilität zu überprüfende Messwerte). In fünf der 19 Streckenabschnitte ist die ermittelte Geschwindigkeit außerhalb des Vertrauensbereichs der Geschwindigkeitsreferenz. Für diese Streckenabschnitte ist zur weiteren Plausibilitätsprüfung eine Fusion mit den Detektordaten im zugehörigen Streckenabschnitt durchzuführen. Die Detektorwerte in den fünf gesondert betrachteten Streckenabschnitten sind alle innerhalb des Vertrauensbereichs der Detektorreferenz. Dies lässt darauf schließen, dass keine Störungen in dem Streckenabschnitt zu erkennen sind. Die ermittelten Geschwindigkeitsmesswerte sind daher nicht plausibel und müssen alle verworfen werden.

Bewertung

Das entwickelte Verfahren wurde im Probetrieb getestet, bei dem nicht alle im Motorisierten Individualverkehr auftretenden Situationen abgebildet werden konnten. Eine Stausituation, bei der auch die Detektorenwerte im Online-Betrieb deutliche Veränderungen gegenüber der Referenz ergeben, konnte nicht nachgestellt werden. Alle simulierten Stausituatio-

nen wurden mit einem Endgerät erfasst. Diese Einzelmesswerte waren durch eine Sensorfusion mit Detektorwerten auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen. Insgesamt wurden 57 Einzelberechnungen für Streckenabschnitte von Hand nachvollzogen (vgl. **Anlage 9.7.4**). Das eingesetzte FTD-Verfahren lieferte in allen Fällen korrekte Ergebnisse.

Weiteres Entwicklungspotenzial

Es ist denkbar, streckenspezifische Verkehrsstärke-Geschwindigkeit-Diagramme aus den jeweiligen Messwerten herzuleiten. Maßgeblichen Einfluss auf diese Abhängigkeiten haben im innerstädtischen Bereich die Knotenpunkte. Der Einfluss von Freigabezeiten an Lichtsignalanlagen sowie das Umfeld (z.B. Anzahl der Fahrstreifen) sind dabei zu berücksichtigen. Ziel des Ansatzes ist es, aus gemessenen Geschwindigkeiten auf das Verkehrsaufkommen in dem jeweiligen Streckenabschnitt zu schließen.

4.4 Verkehrslage – Öffentlicher Verkehr

Die Ermittlung von Verspätungen im Öffentlichen Verkehr ist eine wichtige Voraussetzung für eine Echtzeitfahrplanauskunft. Die Verkehrsteilnehmer werden in Zukunft erwarten, dass sie regelmäßig über die aktuellen Abfahrtszeiten von Bussen und Bahnen auf ihrer Route informiert werden. Die Anbieter von ÖPNV-Routingdiensten haben bereits erste Produkte auf den Markt gebracht, die eine Echtzeitfahrplanauskunft ermöglichen. Eine wichtige Grundlage ist allerdings die flächendeckende Datenerfassung von Verspätungen / Verfrühungen der Fahrzeuge im Öffentlichen Verkehr. Rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL) übernehmen diese Aufgabe bereits. Leider sind solche Systeme sehr kostenintensiv und bislang noch nicht flächendeckend verbreitet.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren ermöglicht die Ermittlung von Verspätungen / Verfrühungen mit handelsüblichen Mobiltelefonen.

In Darmstadt wurde das Verfahren exemplarisch getestet. Hierzu wurde der Sollfahrplan der HEAG-Verkehrs-GmbH in ein Datenmodell überführt. In einem nächsten Schritt wurden Testfahrten mit der Straßenbahnlinie 9 mit folgendem Ablauf durchgeführt:

1. Festlegung der Reiseroute (von Start-Haltestelle nach Ziel-Haltestelle).
2. Ermittlung der nächstmöglichen Fahrtgelegenheit der Reiseroute.
3. Auswahl der Fahrtgelegenheit.
4. Durchführung der Fahrt.

Zur Durchführung der Tests wurde für das Mobiltelefon eine WEB-basierte Oberfläche erstellt, über die der Benutzer alle Eingaben tätigen kann. Es wurden im System zwei Reiserouten fest hinterlegt, um die Eingaben zu vereinfachen. Reiseroute 1 lag zwischen der Haltestelle Mozartturm und dem Luisenplatz in Darmstadt. Reiseroute 2 war entsprechend die Gegenrichtung. Die Festlegung der Reiserouten diente der eindeutigen Zuweisung der Fahrt zum Sollfahrplan.

4.4.1 Festlegung der Reiseroute

Die Auswahl der Reiseroute erfolgt über die Eingabe am mobilen Endgerät. Die Datenübertragung zwischen mobilem Endgerät und der Zentrale dauert ca. 5 bis 10 Sekunden. Als Ergebnis werden Fahrtmöglichkeiten zwischen Start- und Zielhaltestelle angezeigt.

4.4.2 Ermittlung der nächstmöglichen Fahrtgelegenheit der Reiseroute

Aufbauend auf der Reiseroutenanfrage wird in der Zentrale eine Abfrage durchgeführt, um die nächstmöglichen Fahrtgelegenheiten für diese Relation zu ermitteln. Hierzu wurde der Soll-Fahrplan von allen Bussen und Straßenbahnen der HEAG-Verkehrs-GmbH in einem VDV-Datenmodell abgelegt. Das Fahrtenangebot (Echtzeit) wird dem Verkehrsteilnehmer innerhalb kurzer Zeit angezeigt.

4.4.3 Auswahl der Fahrtgelegenheit

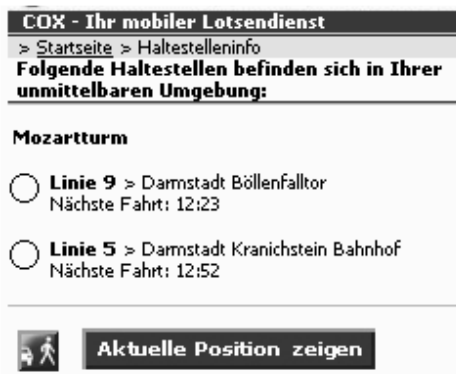


Bild 4-10: ÖV-Angebot in Abhängigkeit vom Standort

Der Verkehrsteilnehmer hat dann die Möglichkeit, eine Fahrt auszuwählen (z.B. Linie 9, Abfahrt Haltestelle Mozartturm um 12:23 Uhr, vgl. **Bild 4-10**). Durch diese Fahrtauswahl wird der Zentrale mitgeteilt, dass man in das zugehörige Fahrzeug an der Haltestelle Mozartturm voraussichtlich einsteigen wird. Durch diese Fahrtauswahl kann in der Zentrale automatisch die voraussichtliche Ankunftszeit des Verkehrsteilnehmers berechnet werden.

Derzeit wird bei dem Verfahren noch davon ausgegangen, dass der Verkehrsteilnehmer sich auch wie geplant verhalten wird. Zukünftig sollte das System spontane Änderungen der Reiseaktivität erkennen, und diese bei den zentralenseitigen Berechnungen berücksichtigen.

4.4.4 Durchführung der Fahrt

Zentralenseitig sind die voraussichtlichen Ankunftszeiten der ausgewählten Fahrt bekannt. Dadurch, dass der Verkehrsteilnehmer mit einem mobilen Endgerät ausgestattet ist, wird bei der Ankunft an einer Haltestelle automatisch ein Übertragungsimpuls der aktuellen Position und der Ankunftszeit an die Zentrale ausgelöst. Es wird dann eine Überprüfung der Ist-Ankunftszeit mit der Soll-Ankunftszeit durchgeführt.

Während einer Testfahrt am Mittwoch, 20. April 2005 mit der Straßenbahnlinie 9 zwischen den Haltestellen „Mozartturm“ und „Bollenfalltor“ in Darmstadt wurden manuell die Ankunftszeiten und Abfahrtszeiten an den Haltestellen notiert. Hierdurch konnten anschließend mögliche Verspätungen durch eine Gegenüberstellung mit dem Soll-Fahrplan berechnet werden. Für eine Bewertung der umgesetzten FTD-Verfahren im Öffentlichen Verkehr wurden die zentralenseitigen Berechnungen den manuellen Erhebungen gegenübergestellt. Das Ergebnis der Auswertungen zeigt **Tabelle 4-4**.

Während der Fahrten wurde an 24 Haltestellen angehalten (12 je Fahrtrichtung). Wie **Bild 4-2** zeigt, wurden alle Haltepositionen richtig erkannt und an die Zentrale übertragen. Die automatisierte Berechnung der Verspätungen verlief außerordentlich zuverlässig. Die Abfahrt von einer Haltestelle wurde beim FTD-Verfahren im Mittel ca. 4 Sekunden verspätet gegenüber der manuellen Erhebung festgestellt. Diese Verzögerung entsteht dadurch, dass die Abfahrt eines Fahrzeugs erst dann vom System festgestellt wird, wenn bereits eine kurze Wegdistanz zurückgelegt wurde.

1. Fahrt: Linie 9; Mozartturm->Böllenfalltor am Mittwoch, 20.4.2005						
Haltestelle	Soll-Abfahrt Fahrplan	Ist-Abfahrt		Verspätungsberechnung		Differenz
		manuelle Erhebung	FTD	manuelle Erhebung	FTD	
Mozartturm	17:41:00	17:42:30	17:42:42	00:01:30	00:01:42	00:00:12
Berliner Allee	17:43:00	17:44:40	17:44:40	00:01:40	00:01:40	00:00:00
Rhein-/Neckarstraße	17:45:00	17:46:15	17:46:19	00:01:15	00:01:19	00:00:04
Luisenplatz	17:47:00	17:48:12	17:48:18	00:01:12	00:01:18	00:00:06
Schloß	17:49:00	17:49:22	17:49:29	00:00:22	00:00:29	00:00:07
Holzstraße	17:50:00	17:50:36	17:50:42	00:00:36	00:00:42	00:00:06
Schulstraße	17:51:00	17:51:37	17:51:42	00:00:37	00:00:42	00:00:05
Roßdörfer Platz	17:52:00	17:53:29	17:53:33	00:01:29	00:01:33	00:00:04
Herdweg	17:53:00	17:54:47	17:54:50	00:01:47	00:01:50	00:00:03
Jahnstraße	17:54:00	17:55:58	17:56:02	00:01:58	00:02:02	00:00:04
Steinberg/Stadion	17:55:00	17:57:05	17:57:07	00:02:05	00:02:07	00:00:02
Böllenfalltor	17:58:00	17:58:20	17:58:27	00:00:20	00:00:27	00:00:07
2. Fahrt: Linie 9; Böllenfalltor->Mozartturm am Mittwoch, 20.4.2005						
Haltestelle	Soll-Abfahrt Fahrplan	Ist-Abfahrt		Verspätungsberechnung		Differenz
		manuelle Erhebung	FTD	manuelle Erhebung	FTD	
Böllenfalltor	18:00:00	18:03:44	18:03:52	00:03:44	00:03:52	00:00:08
Steinberg/Stadion	18:01:00	18:05:27	18:05:29	00:04:27	00:04:29	00:00:02
Jahnstraße	18:02:00	18:06:41	18:06:41	00:04:41	00:04:41	00:00:00
Herdweg	18:03:00	18:07:53	18:07:55	00:04:53	00:04:55	00:00:02
Roßdörfer Platz	18:05:00	18:09:20	18:09:21	00:04:20	00:04:21	00:00:01
Schulstraße	18:06:00	18:10:54	18:10:58	00:04:54	00:04:58	00:00:04
Holzstraße	18:07:00	18:11:48	18:11:44	00:04:48	00:04:44	00:00:04
Schloß	18:09:00	18:13:12	18:13:05	00:04:12	00:04:05	00:00:07
Luisenplatz	18:11:00	18:15:06	18:15:10	00:04:06	00:04:10	00:00:04
Rhein-/Neckarstraße	18:13:00	18:17:32	18:17:33	00:04:32	00:04:33	00:00:01
Berliner Allee	18:14:00	18:18:57	18:18:58	00:04:57	00:04:58	00:00:01
Mozartturm	18:16:00	18:20:59	18:20:56	00:04:59	00:04:56	00:00:03

Tabelle 4-4: Gegenüberstellung der Abfahrtszeiten aus manueller Erhebung und automatisierter Berechnung mittels der FTD-Verfahren mit Verspätungsberechnung

Bei den durchgeführten Testfahrten traten sowohl auf der Hinfahrt als auch auf der Rückfahrt Verspätungen auf. Bei der Rückfahrt entstanden diese vor allem durch die Aufnahme eines Anschlusses einer Buslinie.

Bewertung

Das entwickelte FTD-Verfahren liefert sehr zuverlässige und korrekte Ist-Abfahrtszeiten von Fahrzeugen des Öffentlichen Verkehrs. Diese werden im Datenmodell hinterlegt und können für Fahrgastinformationen genutzt werden.

Weiteres Entwicklungspotenzial

Bislang ist durch den Benutzer die Eingabe der gewählten Linie und des Kurses über eine Eingabemaske erforderlich (vgl. **Bild 4-10**). Für den Kunden ist es wünschenswert, dass das System automatisiert die Verkehrsmittelwahl und die gewählte Linie erkennt. Mögliche Lösungen dazu wurden in **Kapitel 3.4.2** beschrieben. Diese Lösungsansätze sind weiter zu vertiefen.

4.5 FTD-Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr (Fußgänger und Radfahrer)

Ziel des FTD-Prozesses für Fußgänger und Radfahrer ist es, Routinginformationen unter

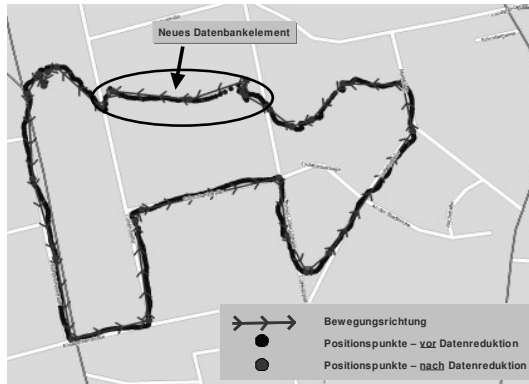


Bild 4-11: Neue erkannte Streckenelemente für Fußgänger

Berücksichtigung von Fußwegen bzw. Radwegen bereitstellen zu können. Dabei werden die Bewegungsinformationen unterschiedlicher mobiler Endgeräte genutzt, um neue Datenbankelemente (Fußwege und Radwege) zu identifizieren (vgl. **Kapitel 3.8**). Die entwickelte Methodik wurde umfassend getestet. Die Ergebnisse von erkannten Fußgängerstreckenabschnitten zeigt **Bild 4-11**. Im nördlichen Bereich ist eine Fußgängerzone, die bislang nicht in Datenbanken abgelegt ist. Dieser Abschnitt wurde als neues Element erkannt und soll für Lotsenfunktionen zur Verfügung

gestellt werden. Eine weitergehende Betrachtung wurde bereits in **Kapitel 3.8** durchgeführt.

Weiteres Entwicklungspotenzial

Die neu erkannten Datenbankelemente müssen bei der Entwicklung von Lotsendiensten in das dann genutzte Datenmodell integriert werden. Dabei sind die Datenbankeinträge wie von Knoten- / nach-Knotenbeziehungen sowie die Nummerierung der einzelnen Netzelemente (Knoten, Kanten) in einem dynamischen Prozess anzupassen.

Bislang wurde eine zweidimensionale Erkennung neuer Datenbankelemente umgesetzt. Gerade in komplexen Umsteigebahnhöfen mit unterschiedlichen Ebenen sind auch Höheninformationen mit zu nutzen. Hierzu müssen die Höhenangaben zuverlässig ermittelt werden, was mit den bislang umgesetzten Ortungsverfahren nicht zuverlässig möglich ist (vgl. **Kapitel 6.3**).

5 Rahmenbedingungen

5.1 Betreibermodell

Ein wesentlicher Aspekt bei der Umsetzung neuer Technologien zur Datenerfassung und Datenaufbereitung zur Erzeugung kollektiver und individueller Verkehrsinformationen sind belastbare Betreibermodelle und Geschäftsmodelle. Der Grund dafür liegt in der erforderlichen Kooperation einer Vielzahl von Institutionen wie Kommunen, Verkehrsunternehmen, Einrichtungen der Bundesländer und ggf. privater Unternehmen. Jeder der genannten Partner kann zur Erfassung des Verkehrsgeschehens beitragen bzw. hat hoheitliche Aufgaben zu erfüllen (z.B. der Verkehrssteuerung). Gleichzeitig entstehen für eine flächendeckende Erfassung des Verkehrsgeschehens Kosten, die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gedeckt werden müssen. Daher besteht ein Ansatz zur Kostendeckung in der Vermarktung von Verkehrsdaten. Erfahrungen der vergangenen Jahre haben auch gezeigt, dass Nutzer von Verkehrsinformationsdiensten in der Regel nicht bereit sind, ein hohes Nutzungsentgelt zu bezahlen (vgl. Passo-Dienste). Daher gibt es Überlegungen, Verkehrsinformationsdienste mit weiteren Diensten des „mobile commerce“ (M-Commerce) zu verbinden. Hierzu gibt es bereits eine Vielzahl von Anwendungen von Telekommunikationsunternehmen. Zu nennen sind hier das M-Ticketing (Erwerb von Eintrittskarten mit dem Handy), M-Couponing, (elektronischer Warengutschein) und nicht zu vergessen das e-Ticketing und m-Ticketing (Erwerb von Fahrscheinen im Öffentlichen Verkehr). Die Beispiele zeigen, dass Komplementärdienste nicht von Öffentlichen Aufgabenträgern angeboten werden können. Private Unternehmen verfügen über eine weitaus bessere Marktposition. Unter Einbeziehung der Erkenntnisse sollte das Dienstangebot im Verkehr unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gesehen werden. Dazu erscheint eine Zusammenarbeit privater und Öffentlicher Institutionen erstrebenswert (PPP Public-Private-Partnership). Die Public-Private-Partnership hat das Ziel, die Stärken Öffentlicher und privater Aufgabenträger zu vereinen. Die hieraus entstehenden Kooperationen können sehr vielfältig sein. Wie die Aufgabenverteilung innerhalb einer PPP zu definieren ist, zeigt **Bild 5-1**.

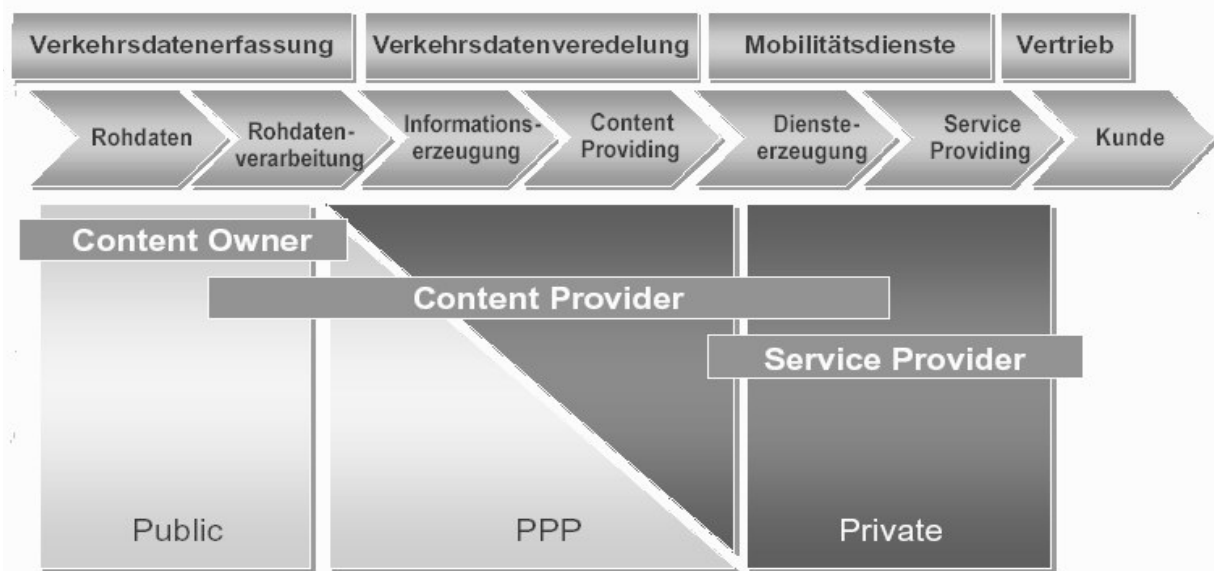


Bild 5-1: Wertschöpfungskette „Verkehrsdaten → Mobilitätsdienst“ in einer PPP
[T-INFO, 2003]

Die Verkehrsdatenerfassung liegt im Wesentlichen in der Verantwortung Öffentlicher Aufgabenträger. Sie sind gleichzeitig Eigentümer der Daten. In den vergangenen Jahren erfassen verstärkt auch private Unternehmen Verkehrsdaten. Die Datenaufbereitung wird von unterschiedlichen Institutionen, je nach weiterer Nutzung, durchgeführt. Die eigentliche Bereitstellung von Verkehrsinformationsdiensten wird häufig von privaten Unternehmen vorgenommen. Diese auf den ersten Blick durchaus sinnvoll erscheinende Public-Private-Partnership birgt allerdings auch Risiken, für die bislang nur wenige Lösungsvorschläge erarbeitet wurden. Einige offene Fragen seien an dieser Stelle genannt:

- Wie werden Verkehrsdaten zwischen den Partnern vergütet?
- Wer ist für die Veredelung der Daten verantwortlich?
- Stehen öffentliche Steuerungsstrategien mit privaten Interessen in Einklang?
- Wie werden regionale Verkehrsmanagementinteressen in eine PPP eingebunden?
- Wie kann eine hohe Datenqualität gewährleistet werden?
- Wer ist verantwortlich zu machen, wenn falsche Verkehrsinformationen gegeben werden?
- Sind wettbewerbsrechtliche Aspekte zu berücksichtigen?
- Welche vertraglichen Vereinbarungen sind zu treffen?

5.2 Abbildung städtischer und regionaler Strategien des Verkehrsmanagements in einer Public-Private-Partnership

In diesem Themenfeld eröffnet sich ein breites Spektrum des Forschungsbedarfs. In Bayern wurde mit dem Forschungsprojekt INVENT eine Initiative gestartet, bei der eine Optimierung des strategischen Zusammenwirkens von öffentlicher Verkehrslenkung und individueller Fahrempfehlung im Vordergrund steht. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde privaten Dienst Anbietern die Möglichkeit geboten, kollektive Verkehrssteuerungsstrategien bei der Erstellung ihrer Routenempfehlung mit einzubeziehen [BOGENBERGER, 2005]. So wird z.B. verhindert, dass private Dienstanbieter ihre Kunden durch verkehrsberuhigte Nebenstraßen lenken oder über Strecken, auf denen der Verkehrsfluss durch kollektive Maßnahmen dosiert wird. Von einer solchen Abstimmung profitiert der einzelne Fahrer genauso wie der Dienstanbieter. Für öffentliche Aufgabenträger bietet sich zusätzlich der Vorteil, dass mit den individuellen Zielführungssystemen mehr Verkehrsteilnehmer erreicht werden können. Im Rahmen des Forschungsprojektes INVENT [BOGENBERGER, 2005] wurden die technischen Voraussetzungen geschaffen, die Informationen aus Verkehrsmanagementzentralen für individuelle und kollektive Informationssysteme gleichermaßen zur Verfügung zu stellen.

Neben den technischen Gesichtspunkten ist vor allem auch eine langfristige Finanzierung mit einem belastbaren Geschäftsmodell ein wichtiges Fundament einer gut funktionierenden Public-Private-Partnership (PPP). Bislang sind allerdings keine entsprechenden Konzepte bekannt, die diesen Ansatz umsetzen. Nachfolgend sollen daher erste Ideen für eine PPP in einem Betreibermodell mit einem Telekommunikationsunternehmen erläutert werden.

Telekommunikationsunternehmen bieten den Kunden eine Vielzahl von „Location-Based-Services“ an und vermarkten diese bereits erfolgreich. Personalisierte Dienste und Abrechnungsverfahren sind eine Kernkompetenz der Unternehmen. Positioniert sich ein Telekommunikationsunternehmen als Mobilitätsdienstleister besteht die Möglichkeit, dass Verkehrsleitzentralen, bzw. Städte und Kommunen über neue Kanäle „hoheitliche Aufgaben“ der Verkehrssteuerung und Verkehrslenkung verbreiten können (INVENT-Ansatz). So kann es beispielsweise sein, dass ein Straßenabschnitt aktuell über genügend hohe Kapazitäten verfügt, aber aus Gründen der städtischen Verkehrssteuerungsstrategien derzeit nicht in ein Routing des Betreibers mit einbezogen werden soll. Gleichzeitig ist für die Stadt die Generierung eines flächendeckenden Verkehrslagebilds wichtig, um darauf aufbauend Steuerungsentscheidungen treffen zu können.

Öffentliche Steuerungsstrategien können auf den ersten Blick im Widerspruch zu persönlichen Präferenzen der Kunden stehen, die den schnellsten oder kürzesten Weg ans Ziel wählen möchten. Die Aktivierung einer öffentlichen Steuerungsstrategie kann aber dazu beitragen, dass Verkehrsengpässe überhaupt vermieden werden. Dies wiederum kommt den Verkehrsteilnehmern zu Gute.

Der folgende Datenfluss kann entstehen:

- Die Stadt erfasst Daten im Straßennetz und im ÖV (stationäre Daten).
- Das Telekommunikationsunternehmen erfasst Verkehrsdaten von mobilen Endgeräten (z.B. FTD-Verfahren) und übergibt diese an die Stadt bzw. Kommune.
- Die Stadt erzeugt ein lokales Verkehrslagebild (Datenaufbereitung).
- Die Stadt / Kommune kann auf der Grundlage administrativer Entscheidungen das Verkehrslagebild so anpassen, dass Straßenabschnitte und ÖV-Linien bei der Erstellung von Routenempfehlungen durch den Betreiber nicht mehr als bevorzugte Strecken ausgegeben werden. Dies kann dazu führen, dass Verkehrsengpässe überhaupt entstehen.
- Die Stadt übergibt das modifizierte Verkehrslagebild an den Betreiber.
- Der Betreiber kann Mobilitätsdienste aus den Verkehrsdaten generieren und an Kunden vermarkten.

Eine Anpassung des Verkehrslagebildes kann im Motorisierten Individualverkehr durch eine Reduzierung der in Datenmodellen hinterlegten Geschwindigkeiten erfolgen. Dadurch wird der Streckenwiderstand erhöht und individuelle Routenberechnungen werden das so modifizierte Streckenelement nicht als bevorzugte Strecke in das Routing einbeziehen.

Eine Erweiterung ist in der „regionalen Regieebene“ zu sehen, da immer häufiger der Ansatz des regionalen Verkehrsmanagements verfolgt wird, in dem Strategien des Verkehrsmanagements abgestimmt werden. In der Region Frankfurt RheinMain wurde dazu eine Verkehrsmanagement-Gesellschaft gegründet (IVM – Integriertes Verkehrsmanagement in der Region Frankfurt RheinMain). Gibt es eine regionale Verkehrsmanagement-Ebene, so erhält diese von den Städten und Kommunen lokale Verkehrslagebilder, mit Staus und Überlastungen im Straßennetz, bzw. über Verspätungen im öffentlichen Verkehr. Diese sind auf der Grundlage regionaler Abstimmungen so anzupassen, dass Strecken und ÖV-Linien bei der Erstellung von Routenempfehlungen durch einen Betreiber nicht als bevorzugte Abschnitte ausgegeben werden. Das so angepasste regionale Verkehrslagebild wird anschließend an das Telekommunikationsunternehmen (Betreiber des Mobilitätsdienstes) weitergeleitet.

Da Telekommunikationsunternehmen bundesweit tätig sind, kann durch einen Kooperationsverbund mit weiteren Regionen ein bundesweites Verkehrslagebild aufgebaut werden. Dabei werden „hoheitliche Aufgaben“ der Verkehrssteuerung der Städte und Regionen bei der Generierung von Diensten berücksichtigt. Die Vorgehensweise veranschaulicht **Bild 5-2**:

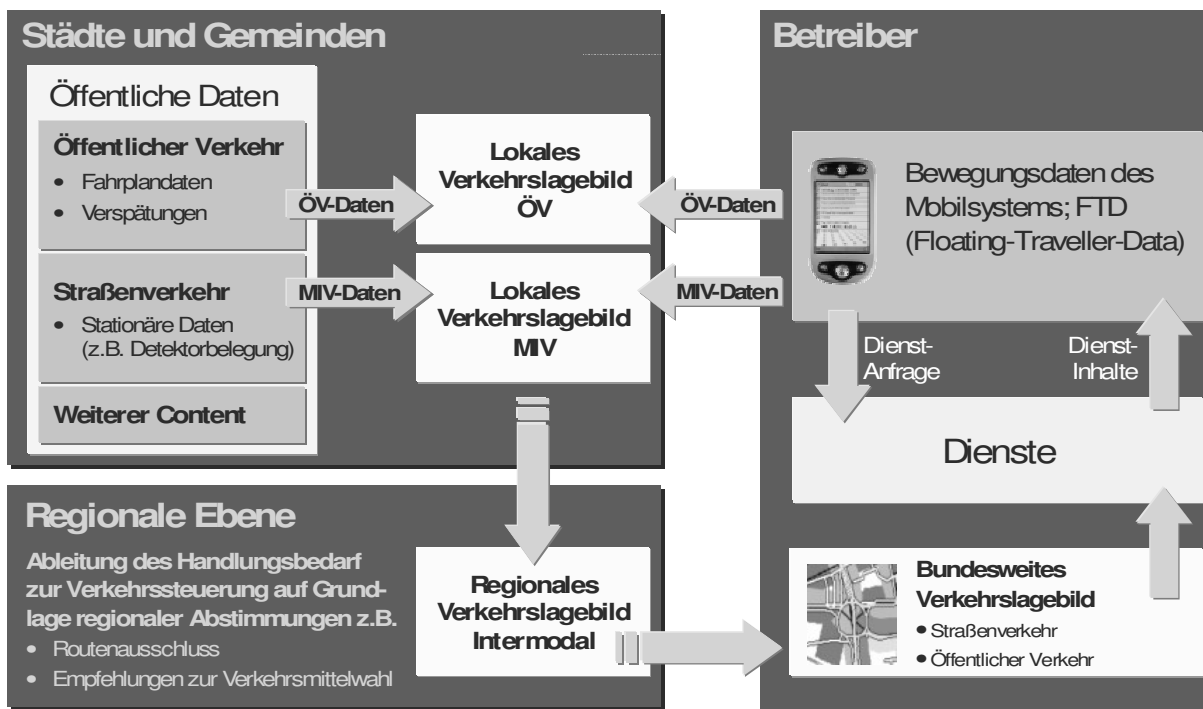


Bild 5-2: Datenfluss im Betreibermodell
„Betrieb durch Telekommunikationsunternehmen“

Die Berücksichtigung von Verkehrssteuerungsstrategien in Routingempfehlungen kann dazu beitragen, dass Verkehrsengepässe zu bestimmten Situationen vermieden werden. Von diesen Empfehlungen können die Verkehrsteilnehmer profitieren. Allerdings ist die Planung und Abstimmung von Steuerungsstrategien ein oftmals langwieriger und kompromissbehafteter Prozess. Ob der vorgeschlagene Weg realistisch ist, muss ein Umsetzungsprozess zeigen.

Die Finanzierung der Dienste und der Datenerfassung könnte folgendes Geschäftsmodell mit einer Vermarktung von Verkehrsdaten in drei Segmenten zu Grunde liegen:

1. Aufbau eines Mobilitätsdienstes

Die Vermarktung der Mobilitäts-Dienste erfolgt unter dem Namen „Location-based Services“. Bisherige Location-based-services der Telekommunikationsunternehmen erfahren durch die neuen verkehrlichen Komponenten mit Online-Daten eine deutliche Aufwertung und führen zu einer Verzahnung mit den bereits etablierten Diensten.

2. Vermarktung an Portale

Andere Portale können die Dienste und Services lizenzieren bzw. erwerben und unter eigener Marke anbieten. Potenzielle Kunden könnten sein:

- Stadtportale.
- Regionale Mobilitätsportale.
- Internet und mobile Internetportale (Yahoo, T-Online, Vodafone live etc.).

3. Vermarktung an Verkehrsträger, Verkehrsleitzentralen

Erwerb von Verkehrsdaten:

Die Bereitstellung von Verkehrsdaten durch Kommunen und Verkehrsleitzentralen der Länder wird durch den Betreiber vergütet.

Erwerb der Rechte:

Der Erwerb der Rechte an den Verkehrsdaten regionaler Unternehmen zu einem bundesweiten Informations- und Datenpool stellt eine neue Möglichkeit dar, diese Daten für überregionale Zwecke und Interessen der Verkehrsleitzentralen und der Verkehrsträger bereitzustellen. Rechtliche Fragen der Datenüberlassung an Dritte sind dabei noch ungeklärt.

Da es bislang in diesem Themenfeld keine Erfahrungen und tiefer gehende Lösungsvorschläge gibt, ist der Forschungsbedarf groß. Vor allem die Diskussion mit verschiedenen Partnern (z.B. Deutsche Telekom AG, Stadt Darmstadt, Land Hessen, Bundesanstalt für Straßenwesen) haben gezeigt, dass gerade belastbare Betreibermodelle und Geschäftsmodelle eine Schlüsselfunktion zukünftiger Verkehrsinformationsdienste darstellen.

5.3 Rechtliche Aspekte / Datenschutz

5.3.1 Datenschutzrechtliche Risiken

Mit zunehmender Verbesserung der Lokalisierungstechnologien ist es möglich, den Aufenthaltsort von Mobiltelefonen immer genauer zu bestimmen. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz der fortdauernden Aufzeichnung von Bewegungsmustern von Mobiltelefonen zur Ableitung der aktuellen Verkehrslage ermöglicht – bei missbräuchlicher Verwendung – die Erstellung von Nutzerprofilen. Bei einer Verknüpfung von Bewegungsdaten mit soziodemografischen Daten können detaillierte Informationen zum Verhalten unterschiedlicher Nutzergruppen erstellt werden. In diesem Kontext sind eine Vielzahl von datenschutzrechtlichen Risiken zu beachten. Vor dem Hintergrund der technologischen Möglichkeiten und nicht zuletzt auch um das Vertrauen der Nutzer von Location-Based-Services (LBS) zu stärken, gilt daher der datenschutzrechtlichen Ausgestaltung standortbasierter Dienste ein besonderes Augenmerk. Die Aufgabe des Datenschutzes ist dabei der Schutz personenbezogener Daten – also auch personalisierter Standortdaten. Auf den folgenden Seiten werden die derzeit in Kraft befindlichen europäischen und deutschen Richtlinien und Gesetze zusammengefasst, die sich mit dem Thema Kommunikation und Speicherung von standortbezogenen Nutzerdaten beschäftigen. In **Kapitel 5.3.3** werden wichtige datenschutzrechtliche Aspekte bei einer Bereitstellung von mobilen Lotsendiensten im Verkehr zusammengefasst.

5.3.2 Grundlagen nach europäischem und deutschem Recht

Europäisches Recht

Das Europäische Parlament hat in der *Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation* [EU, 2005] Regelungen über die Verarbeitung personenbezogener Daten und den Schutz der Privatsphäre in der elektronischen Kommunikation festgelegt. Für öffentliche Kommunikationsnetze sollten besondere rechtliche, ordnungspolitische und technische Vorschriften zum Schutz der Grundrechte und Grundfreiheiten von Personen erlassen werden, insbesondere in Hinblick auf die zunehmenden Fähigkeiten zur automatischen Speicherung und Verarbeitung personenbezogener Daten über Teilnehmer und Nutzer. Danach können Standortdaten sich beziehen auf den Standort des Endgeräts des Nutzers nach geographischer Länge, Breite und Höhe, den Grad der Genauigkeit der Standortinformationen, die Identifizierung des Netzpunktes, an dem sich das Endgerät zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet, und den Zeitpunkt, zu dem die Standortinformationen erfasst wurden.

Es wird in der Datenschutzrichtlinie unterschieden in Aspekte der Datenübertragung (Kommunikation) und der Verarbeitung von Nutzerdaten. Die Kommunikationswege müssen gegen Mithören, Abhören und Speichern sowie andere Arten des Abfangens oder Überwachens von Nachrichten und Daten geschützt werden (Artikel 5 – „Vertraulichkeit der Kommunikation“).

Die Verarbeitung personenbezogener Daten sind in Artikel 6 „Verkehrsdaten“ geregelt. Danach müssen personenbezogene Daten von Anbietern eines Kommunikationsdienstes

gelöscht oder anonymisiert werden (Artikel 6, Absatz 1). Ein Dienstanbieter kann die Daten zum Zwecke der Vermarktung von Kommunikationsdiensten oder zur Bereitstellung von Diensten mit Zusatznutzen verarbeiten, sofern der Teilnehmer, auf den sich die Daten beziehen, seine Einwilligung gegeben hat. Der Nutzer hat die Möglichkeit, seine Einwilligung zur Verarbeitung der Verkehrsdaten jederzeit zurückzuziehen (Artikel 6, Absatz 3). Der Diensteanbieter muss dem Nutzer mitteilen, welche Arten von Daten verarbeitet werden sollen und wie lange das geschieht.

Deutsches Recht

Die zuvor beschriebene Europäische Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation [EU, 2005] wurde in Deutschland durch eine Neufassung des *Telekommunikationsgesetzes* [TKG, 2004] vom 22. Juni 2004 in deutsches Recht umgesetzt. Eine wesentliche Neuerung im TKG stellt die Vorschrift über *Standortdaten* in § 98 dar. Hierdurch werden die datenschutzrechtlichen Voraussetzungen für das Angebot standortbezogener Dienste gelegt. Nach dem jetzt geltenden Recht dürfen die Standortdaten nur in dem für die Bereitstellung dieser Dienste erforderlichen Maß und innerhalb des dafür erforderlichen Zeitraums verarbeitet werden. Zudem muss die Verarbeitung entweder anonym erfolgen oder der Teilnehmer muss zuvor über die Datenverarbeitung informiert werden und seine Einwilligung erteilt haben. Die Einwilligung ist dabei nicht vor jeder Inanspruchnahme eines Dienstes erforderlich, sondern kann auch im Rahmen des Vertrags über die Erbringung der Dienste mit dem Anbieter erfolgen. Wird das Mobilfunkgerät noch von weiteren Personen genutzt, muss der Teilnehmer diese von der erteilten Einwilligung in Kenntnis setzen. Dadurch soll die ungewollte Preisgabe von Standortdaten durch den jeweiligen Nutzer verhindert werden. Die neue Vorschrift sieht ferner vor, dass Teilnehmern, die ihre Einwilligung zur Verarbeitung von Standortdaten einmal erteilt haben, auch weiterhin die Möglichkeit eingeräumt werden muss, die Verarbeitung solcher Daten für jede Verbindung zum Netz oder für jede Übertragung einer Nachricht auf einfache Weise und unentgeltlich zeitweise zu untersagen [DAT-BERLIN, 2005].

5.3.3 Anwendung auf mobile Lotsendienste im Verkehr

Die Übertragung, Speicherung und Nutzung personenbezogener Daten werden durch die Europäische Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation [EU, 2005] und das deutsche Telekommunikationsgesetz [TKG, 2004] geregelt. Für die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren gibt es zwei Möglichkeiten, die datenschutzrechtlichen Bestimmungen zu berücksichtigen.

1. Anonymisierung von Bewegungsdaten im mobilen Endgerät

Noch bevor die Bewegungsdaten vom mobilen Endgerät an die Zentrale übertragen werden, sind alle Bezüge zum Nutzer zu löschen (z.B. Geräte-Nummer, Telefonnummer etc.). Der Nutzer muss die Möglichkeit besitzen, die Ortungsfunktionalitäten abzuschalten und die Übertragung von Bewegungsspuren an die Zentrale zu stoppen.

2. Einwilligung des Nutzers zur Auswertung von personenbezogener Daten

Findet keine Anonymisierung der Daten im mobilen Endgerät statt, muss der Nutzer seine Einwilligung für die Speicherung und Auswertung der Daten in einer Zentrale geben. Dabei ist ihm der Zweck und die Zeitdauer der Datenspeicherung mitzuteilen. Bei der Übergabe des Endgeräts an einen Dritten muss der neue Nutzer über die Funktionalitäten und die Auswertung der Daten in Kenntnis gesetzt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die Neuregelung des Telekommunikationsgesetzes die Übertragung, Speicherung und Auswertung personenbezogener und vom Standort abhängiger Daten eindeutig geregelt ist. Einer Umsetzung der in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren der „Floating Traveller Data (FTD)“ mit einer Verwendung von Mobiltelefonen steht unter Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte daher nichts entgegen.

5.4 Durchdringungsrate und Kommunikationskosten

5.4.1 Durchdringungsrate

Die Qualität von Verkehrsinformationen hängt stark von der Detektionsrate, der Aktualität und der Funktionsfähigkeit der Datenerzeugung und Datenübertragung ab. Daher wird bei der Nutzung von Floating-Car-Data immer auch die Durchdringungsrate, also die Anzahl der Fahrzeuge mit mobiler Datenerfassung, für eine plausible Aussage zum Verkehrslagebild mit hinterfragt. Vielfach wird eine Durchdringungsrate im Motorisierten Individualverkehr von 2 bis 5% genannt, um eine flächendeckende Erhebung der Verkehrssituation durchführen zu können. Da die Verkehrsnetze allerdings unterschiedlich stark belastet sind, ist eine pauschale Aussage zur Durchdringungsrate nur bedingt korrekt. Daher soll nachfolgend eine detaillierte Betrachtung mit einer Unterscheidung in die verschiedenen Straßenkategorien gegeben werden. Für den Öffentlichen Verkehr werden ebenso an Hand von beispielhaften Berechnungen Aussagen zur Durchdringungsrate gegeben.

Motorisierter Individualverkehr

Im Motorisierten Individualverkehr ist es sinnvoll, die Durchdringungsrate im Verhältnis zum Verkehrsaufkommen auf einzelnen Streckenabschnitten zu sehen. Auf stark befahrenen Strecken sind auch viele Fahrzeuge mit mobiler Erfassungseinrichtung beteiligt, so dass eine geringe Durchdringungsrate erforderlich ist. Zur Herleitung der erforderlichen Durchdringungsrate wird wie folgt vorgegangen:

λ sei die mittlere Anzahl von FTD-Fahrzeugen innerhalb eines Zeitintervalls der Dauer Δt (z.B. 15 Minuten). Unter der Annahme einer Poissonverteilung ist die Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung von k Fahrzeugen innerhalb Δt :

$$p(\lambda, k) = e^{-\lambda} * \frac{\lambda^k}{k!}$$

$$\lambda = q_{FTD} * \frac{\Delta t}{t}$$

Gleichung 5-1

mit:	λ	= Erwartungswert für die Anzahl der FTD-Fahrzeuge innerhalb Δt	[-]
	k	= Einzelwert der FTD-Fahrzeuge innerhalb Δt	[-]
	Δt	= Länge des betrachteten Zeitintervalls (z.B. 15 Minuten)	[Min]
	t	= Länge des Erwartungszeitintervall (z.B. 60 Minuten)	[Min]
	q_{FTD}	= Verkehrsstärke der FTD-Fahrzeuge	[Fz/h]

Wenn mindestens ein Fahrzeug in einem Zeitintervall Δt eintreffen soll, kann die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens von einem oder mehreren Fahrzeugen aus der Summe aller Eintreffenswahrscheinlichkeiten $P(1)$ bis $P(n)$ abzüglich der Wahrscheinlichkeit des Eintreffens keines Fahrzeugs $P(0)$ errechnet werden. Das heißt, es wird der Wert für λ mit der Wahrscheinlichkeit

$$p(k \geq 1) = 1 - p(0) = 1 - e^{-\lambda} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

gesucht, bei der ein Sollwert überschritten wird. Hier wird als Wahrscheinlichkeit das für, dass mindestens eine Beobachtung pro Zeitintervall der Dauer Δt auftritt, der Wert $p(k \geq 1) = 0,95$ vorgeschlagen. D.h.: In nur 5% aller Fälle liegt keine Beobachtung vor. Daraus folgt:

$$\lambda (95\%, 1 \text{ Fz pro } 15 \text{ Min.}) = 3 \quad \text{Gleichung 5-3}$$

Sofern mindestens 2 FTD-Fahrzeuge pro 15-Minuten-Intervall mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% beobachtet werden sollen, ist folgende Gleichung zu lösen:

$$p(k \geq 2) = 1 - p(k = 0) - p(k = 1) = 1 - e^{-\lambda} - e^{-\lambda} * \lambda = 0,95$$

$$p(k \geq 2) = e^{-\lambda} * (1 + \lambda) = 0,05 \quad \text{Gleichung 5-4}$$

$$\lambda (95\%, 2 \text{ Fz pro } 15 \text{ Min.}) = 4,74 \quad \text{Gleichung 5-5}$$

Hochgerechnet auf ein Stunde müssen daher 12 Fahrzeuge bzw. 19 Fahrzeuge mit einer FTD-Erfassung jeden Streckenabschnitt befahren, damit bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 95% jeder Streckenabschnitt 1 bzw. 2 in einem 15 Minuten-Intervall befahren wird. Hochgerechnet auf einen Tag bedeutet dies, dass jeder Streckenabschnitt im Mittel pro Tag von 288 (min. 1 Messereignis pro 15 Min.) bzw. 456 (min. 2 Messereignisse pro 15. Min.) Fahrzeuge mit einer FTD-Erfassung befahren müssen, deren Erscheinen sich gleichmäßig über die 24 Stunden des Tages verteilen sollten.

Andererseits ist in den verkehrsschwachen Zeiten eine präzise Verkehrslageerfassung weniger bedeutend, weil dann auch weniger Störungen zu befürchten sind. Deswegen kann sich eine Hochrechnung auf die benötigten Ausstattungsrate im Wesentlichen auf die Spitzenstunde konzentrieren.

Zur Berechnung der Gesamtausstattungsgrade sind zu berücksichtigen:

- Wie viele Streckenabschnitte durchfährt ein FTD-Fahrzeug in 15 Minuten
- begrenzt durch
 - Reiseweite,
 - Reisegeschwindigkeit?
- Wie viele Fahrten macht ein FTD-Fahrzeug pro Spitzenstunde auf einer Strecke?
- Wie viele Fahrzeuge fahren überhaupt in der Spitzenstunde auf dem relevanten Straßennetz?

Die Durchdringungsrate D , also die prozentuale Angabe der Fahrzeuge, die mit Mobiltelefonen in Abhängigkeit des Gesamtverkehrs q auszustatten sind, kann über einen Dreisatz hergeleitet werden:

$$D = \frac{q_{FTD}}{q_{ges}} * 100$$

Gleichung 5-6

mit:

D	= Durchdringungsrate der mit Mobiltelefonen auszustattenden Fahrzeuge	[%]
q_{FTD}	= Anzahl der FCD-Fahrzeuge innerhalb Δt	[Fz/h]
q_{ges}	= Gesamtverkehr	[Fz/h]

Unter Verwendung von **Gleichung 5-5** können Durchdringungsraten in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen errechnet werden:

Anz. Fz.	Δt [min]	q (p=95%)	250 [Kfz/h]	500 [Kfz/h]	1000 [Kfz/h]	1500 [Kfz/h]	2000 [Kfz/h]	2500 [Kfz/h]	3000 [Kfz/h]
1	15	12	4,8%	2,4%	0,6%	0,8%	0,6%	0,48%	0,4%
2	15	19	7,6%	3,8%	1,9%	1,3%	0,95%	0,76%	0,63%

Tabelle 5-1: Durchdringungsraten D [%] in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke (q_{ges}) bei der Forderung, das mindestens 1 oder 2 Fahrzeuge einen Streckenabschnitt befahren (bei $P=95\%$).

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen, soll beispielhaft für die Region Frankfurt RheinMain die Gesamtanzahl der Verkehrsteilnehmer ermittelt werden, die mit mobilen Erfassungseinrichtungen ausgestattet sein müssen, um eine vollständige Detektion des Straßennetzes mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% zu erzielen. Der Berechnung liegt das so genannte strategische Verkehrsnetz der Region zu Grunde. Dieses wurde zwischen den Partnern des regionalen Verkehrsmanagements abgestimmt und beinhaltet alle Straßenabschnitte, die von regionaler Verbindungsfunktion sind.

Eine wichtige Eingangsgröße ist das zu erwartende Verkehrsaufkommen auf dem betrachteten Verkehrsnetz. Da hierzu keine genauen Erkenntnisse vorlagen, wurde eine Untersuchung der Bundesanstalt für Straßenwesen herangezogen, in der Verkehrszählungen aus dem Jahr 2000 dokumentiert sind [**BAST, 2003**]. **BREITENBERGER [2005]** hat diese Abschätzung von durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken (DTV) auf unterschiedlichen Streckennetzen genutzt, um daraus Aussagen zum Verkehrsaufkommen in den Spitzenstunden treffen zu können (q_{HVZ}):

	BAB	Bundesstraßen	Landesstraßen	Kreisstraßen	Innerortsstraßen
Spitzenverkehrsstärke q_{HVZ} [Pkw/h u. Ri.]	1.592	357	164	88	373

Tabelle 5-2: Durchschnittliche Verkehrsstärken (DTV) angelehnt an **BREITENBERGER [2005]**

In der Region Frankfurt RheinMain gibt es derzeit etwa 900 km Autobahnen, 2800 km Bundesstraßen, und 1100 km ergänzendes Straßennetz. Für eine Abschätzung der tatsächlichen Fahrzeuganzahl, die mit mobiler Erfassungseinrichtung auszustatten sind, ist die Annahme zu treffen, dass Verkehrsteilnehmer auf Bundesautobahnen im Mittel eine Geschwindigkeit von 100 Km/h, auf Bundesstraßen 50 Km/h und im ergänzenden Straßennetz etwa 30 Km/h fahren. Aus den Geschwindigkeiten und dem Verkehrsaufkommen gemäß **Tabelle 5-3** kann die mittlere Verkehrsdichte im Straßennetz errechnet werden⁶. Durch das Produkt aus Verkehrsdichte und Gesamtlänge des Straßennetzes kann die Gesamtanzahl der Fahrzeuge im Netz, bzw. mit der Durchdringungsrate die Gesamtanzahl Q_{FTD} bestimmt werden. Den Zusammenhang verdeutlicht **Tabelle 5-3**:

Netzklasse	Länge [km]	Mittl. Geschwin- digkeit V [Km/h]	Spitzen- verkehrs- stärke q_{HVZ} [Pkw/h u. Ri.]	Verkehrs- dichte K [Pkw/km]	Q_{gesamt} [Pkw]	Durchdring- ungsrate D bei q_{HVZ} [%]	Gesamt- anzahl Q_{FTD} [Pkw]
Bundesautobahnen	900	100	1.595	15,95	14.355	0,752	108
Bundesstraßen	2800	50	367	7,34	20.552	3,27	672
ergänzendes Straßennetz	1100	30	250	8,33	6.875	4,8	440
Summe							1220

Tabelle 5-3: Fahrzeugbedarf mit mobiler Erfassungseinrichtung zur vollständigen Detektion im strategischen Netzes der Region Frankfurt RheinMain in der Verkehrsspitzenstunde (HVZ);

Randbedingungen: mindestens 1 Fahrzeug befährt einen Streckenabschnitt mit einer Wahrscheinlichkeit von $P=95\%$ in einem Zeitintervall $\Delta t=15$ Minuten.

Um eine vollständige Detektion der Verkehrslage im strategischen Netz der Region Frankfurt RheinMain in der Verkehrsspitzenstunde zu erzielen, müssten somit ca. 1220 Fahrzeuge mit mobiler Erfassungseinheit gleichzeitig verkehren.

Die Detektion des gesamten Streckennetzes über 24 Stunden erfordert eine wesentlich höhere Fahrzeuganzahl mit mobiler Erfassungseinheit. Diese hängt von der mittleren Gesamtfahrzeit eines Fahrzeugs pro Tag im Streckennetz ab. Da hierfür keine Erkenntnisse vorliegen, wird auf eine weitergehende Berechnung verzichtet.

⁶ Der Zusammenhang Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit ist in **Bild 3-25, S109** verdeutlicht.

Öffentlicher Verkehr

Im Öffentlichen Verkehr ist die Betrachtung relativ einfach, da jedes Fahrzeug des Öffentlichen Verkehrs mit einer mobilen Erfassungseinrichtung ausgestattet sein muss. Wie auch im Motorisierten Individualverkehr soll nachfolgend die Anzahl mobiler Erfassungsgeräte für die Region Frankfurt RheinMain ermittelt werden. Der Rhein-Main-Verkehrsverbund ist Aufgabenträger und Besteller des Öffentlichen Personennahverkehrs in der Region. Er betreibt 33 Regionalbahnlinien, 9 S-Bahnlinien, 152 regionale Buslinien und 798 lokale Buslinien (Stand 10/2004 [RMV, 2004]). Legt man für die unterschiedlichen Linientypen eine feste Taktfolge zu Grunde, kann der Ausstattungsgrad mit mobilen Endgeräten errechnet werden (vgl. **Tabelle 5-4**). Idealerweise würde mobile Endgerät in jedes Fahrzeug des ÖV installiert, um eine flächendeckende Detektion zu erzielen.

Linientyp	Anzahl	Takt	Anzahl mobiler Erfassungsgeräte
Regionalbahnlinien	33	60	33
S-Bahnenlinien	9	15	36
Lokale Buslinien	152	15	608
Regionale Buslinien	789	30	789
Summe			1466

Tabelle 5-4: Anzahl mobiler Erfassungsgeräte zur Detektion aller Fahrzeuge im ÖPNV in der Region Frankfurt RheinMain (Abschätzung)

Die Taktfolge der einzelnen Linientypen wurde aus Fahrplananalysen abgeleitet. Es handelt sich dennoch um Annahmen. Beruhend auf diesen Annahmen sind etwa 1500 mobile Endgeräte einzusetzen, um alle Linien des Rhein-Main-Verkehrsverbunds im Online-Betrieb zu erfassen.

5.4.2 Kommunikationskosten

Die bisherigen Kommunikationsansätze bei Floating-Car-Data basieren im Wesentlichen auf der Übertragung von Staumeldungen über SMS vom mobilen Endgerät an eine Verkehrsrechnerzentrale. Die Übertragung einer SMS kostet bei Mobilfunkanbieter derzeit etwa 19 Cent (Stand: März 2005). Wird davon ausgegangen, dass bei den bisherigen Verfahren der Floating-Car-Data etwa 4 Nachrichten pro Stunde versandt werden, entstehen Kosten in Höhe von 76 Cent pro Stunde. Der im Projekt COX verfolgte Ansatz der paketorientierten Kommunikation über das Internet je nach Verfügbarkeit des Kommunikationsnetzes (GPRS, UMTS, WLAN, Bluetooth) ermöglicht die Abrechnung über das versendete Datenvolumen. Tests haben ergeben, dass das stündliche Datenaufkommen zwischen mobilem Endgerät und der Zentrale ca. 11 KB pro Stunde beträgt. Mobilfunkunternehmen bieten so genannte Volumentarife an, bei denen der Kunde einen Vertrag mit einem monatlichen Inklusiv-Volumen zur Datenübertragung erwerben kann. Monatlich sind für die Datenübertragung von 10 MB bei Standardtarifen etwa 10 Euro zu bezahlen (Stand: März 2005).

Unter der Annahme, dass monatlich etwa 360 Stunden Daten übertragen werden entsteht ein Datenvolumen von ca. 4 MB, so dass mit dem derzeit günstigsten Volumentarifen monatliche Kosten in Höhe von 10 Euro für die Datenübertragung entstehen (Stand: März 2005). Vorteil dieses Ansatzes gegenüber dem SMS-basierten Verfahren ist die fortdauernde Datenerfassung bei deutlich geringen Kosten.

- Monatliche Kommunikationskosten inkl. 10 MB Datentransfer: 10 €
- jährliche Kommunikationskosten je Endgerät: 120 €
- Gerätepreis mit Vertrag (geschätzt für MDA3): 200 €

Die Kosten für eine vollständige Datenerfassung im Öffentlichen Verkehr und im Motorisierten Individualverkehr in der Region Frankfurt RheinMain können nicht abgeschätzt werden, da nicht abschließend geklärt werden kann, wie viele Endgeräte im MIV zur Detektion eines Tages einzusetzen sind. Gleichzeitig müssen im MIV in etwa 1200 Fahrzeuge pro Stunde mit mobiler Erfassungseinheit verkehren. Diese werden allerdings nicht 24 h im dauerhaft Einsatz sein, so dass sich die Gesamtzahl der auszustattenden Fahrzeuge erhöhen wird.

Im öffentlichen Verkehr kann eine Kostenschätzung erfolgen, da die Fahrzeuge i.d.R. ganztägig verkehren.

Investitionskosten Endgeräte	
▪ Ca. 1500 Endgeräte im ÖPNV a 200 €:	300.000 €
▪ Ca. 1200 Endgeräte im Motorisierten Individualverkehr a 200 €	240.000 €
Summe Investitionskosten	540.000 €

Jährliche Betriebskosten Kommunikation	
▪ Ca. 1500 Endgeräte im ÖPNV a 120 €:	180.000 €/Jahr
▪ Ca. 1200 Endgeräte im Motorisierten Individualverkehr a 120€:	144.000 €/Jahr
Summe Betriebskosten pro Jahr	324.000 € /Jahr

Tabelle 5-5: Investitions- und Betriebskosten für eine vollständige Datenerfassung des Straßenverkehrs und des Öffentlichen Verkehrs in der Region Frankfurt RheinMain

Die in **Tabelle 5-5** zusammengestellten Kosten basieren auf Privatkundentarifen von Telekommunikationsunternehmen (z.B. T-Mobile). Großkunden erhalten in der Regel vergünstigte Tarife, wodurch sich sowohl die Investitionskosten als auch die Betriebskosten deutlich reduzieren lassen.

6 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

6.1 Einleitung

Der Focus der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung eines Konzepts und von Verfahren, die eine verkehrsmittelübergreifende Erfassung der Verkehrslage ermöglichen. Die Datenerfassung wird unter Verwendung handelsüblicher Mobiltelefone mit Ortungskomponente durchgeführt. Im Motorisierten Individualverkehr werden zusätzlich Detektoren im Straßennetz für eine Bewertung der Qualität mobil gewonnener Daten genutzt. Die vielen Einzelkomponenten und Verfahren wurden detailliert in **Kapitel 3** dieser Arbeit beschrieben. Im Projekt COX der Multimediainitiative des Landes Hessens und der Deutschen Telekom AG [**MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002**] wurden die Verfahren in einem Prototypen in Darmstadt umgesetzt und einem Praxistest unterzogen (vgl. **Kapitel 4** und **Anlage 9.9**). Aus den praktischen Erfahrungen heraus und aus Gesprächen mit Beteiligten wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen, aus denen der weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet werden kann. Jedes eingesetzte Verfahren wurde hinsichtlich des derzeitigen Entwicklungsstadiums bewertet. Es wurde eine qualitative Bewertung durchgeführt, die sich aus den Praxiserfahrungen des Autors ergeben. Folgendes Bewertungsschema wurde dabei verwendet:

★★★★★ Ausgereiftes Verfahren; kein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.
bis

★ Verfahrensansätze vorhanden; hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.
Neben der Bewertung sind die Verfahren und Aspekte farblich gekennzeichnet (), die in der vorliegenden Arbeit definiert bzw. weiterentwickelt wurden.

An die Bewertung der FTD-Verfahren schließt sich eine Diskussion zum weiteren Handlungsbedarf an.

6.2 Verfahrensbewertung

Verfahren	Bemerkungen	Bewertung
Mobile Endgeräte		
Ortungsverfahren (Indoor / Outdoor).	Ortung innerhalb von Gebäuden und Fahrzeugen ist zu verbessern.	★ ★ ★
Automatisierte Erkennung der Verkehrsmittelwahl.	Bislang wurde Regelbasis aufgebaut und Fuzzy-Technologie getestet. Derzeit noch keine eindeutige Differenzierung möglich. Lösungsvorschläge wurden aufgezeigt.	★
Datenreduktion MIV.	Kein Handlungsbedarf.	★ ★ ★ ★ ★
Datenreduktion ÖV.	Kein Handlungsbedarf.	★ ★ ★ ★ ★
Datenreduktion Fußgänger und Radfahrer.	Kein Handlungsbedarf.	★ ★ ★ ★ ★
Durchgängige Kommunikation		
Kommunikation auf Basis verfügbarer Netze (GPRS, UMTS, WLAN, Bluetooth).	Kein Handlungsbedarf.	★ ★ ★ ★ ★
Zentralenseitige Verfahren MIV		
Import Detektordaten.	Schnittstellen vereinheitlichen (z.B. OCIT).	★ ★ ★ ★
Fehlererkennung Detektordaten.	Weitergehende Analyse auftretender Erfassungsfehler.	★ ★ ★
Import / Fehlererkennung mobiler Daten.	Kein Handlungsbedarf.	★ ★ ★ ★ ★
MapMatching mobiler Daten.	Kein Handlungsbedarf.	★ ★ ★ ★ ★
Bildung von Referenzganglinien für Detektordaten und mobile Daten.	Weitestgehend gelöst. Automatisierte Klassenbildung für Erkennung von Störfällen ergänzen.	★ ★ ★ ★
Plausibilitätsprüfung und Bewertung online erhobener mobiler Daten (FTD-Bewertungskennwert).	Kein Handlungsbedarf.	★ ★ ★ ★ ★
Ermittlung von Reisezeitverlusten aus Daten halteliniennaher Detektoren.	Es gibt Verfahren, deren Umsetzung softwaretechnische Ausrüstung der LSA-Steuergeräte erfordern (vgl. [MÜCK 2002]). Ver-	★

Verfahren		Bemerkungen	Bewertung
		fahren unter Verwendung der Kennwerte Auslastungsgrad, Zählwerte, Freigabezeiten, Entfernung Detektor von Haltelinie, sind zu entwickeln.	
	Online-Vergleich Detektordaten und mobiler Daten mit Referenzganglinien.	Isolierte Betrachtung an Knotenpunktszufahren gelöst. Netzbetrachtung zur Erkennung von bestimmten Situationen zu entwickeln.	★★★★
	Fusion mobiler Daten mit stationären Daten zur Plausibilitätsprüfung.	Kein Handlungsbedarf.	★★★★★
	Einheitliche Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs (LOS) sowohl im innerörtlichen Straßennetz als auch auf Autobahnen / Bundesstraßen unter Verwendung des Kriteriums "Geschwindigkeit".	Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) gibt es bislang kein entsprechendes Verfahren. Die vorliegende Arbeit liefert dazu Lösungsmöglichkeiten.	★★★
Zentralenseitige Verfahren ÖV			
	Übertragung von Echtzeitdaten aus rechnergestützten Betriebsleitzentralen (RBL).	Schnittstellendefinition durch VDV vorgenommen. RBL-Systeme oftmals veraltet. Bei Erneuerung ist eine Umsetzung der Schnittstellen vorzunehmen.	★★★★
	Import / Fehlererkennung mobiler Daten.	Kein Handlungsbedarf.	★★★★★
	MapMatching mobiler Daten.	Kein Handlungsbedarf.	★★★★★
	Automatische Erkennung der genutzten ÖV-Linie und Kursnummer.	Bislang kein Verfahren umgesetzt. Ein möglicher Lösungsweg wurde aufgezeigt.	★
	Echtzeitfahrplan; Vergleich Ist-Ankunftszeit mit Soll-Ankunftszeit.	Neben dem Soll-Ist-Vergleich sollte auch eine Prognose ermöglicht werden.	★★★★
	Einheitliche Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs (LOS).	Kein Handlungsbedarf.	★★★★★

Verfahren	Bemerkungen	Bewertung
Zentralenseitige Verfahren Fußgänger und Radfahrer		
Import / Fehlererkennung mobiler Daten.	Kein Handlungsbedarf.	★★★★★
MapMatching mobiler Daten.	Kein Handlungsbedarf.	★★★★★
Erzeugung neuer Datenbankelemente auf Grundlage mehrfach erhobener Bewegungsspuren unterschiedlicher Endgeräte.	Verfahren unter 2-dimensionaler Betrachtung entwickelt und umgesetzt. 3-dimensionaler Ansatz (z.B. für Gebäude) ist noch nicht gelöst.	★★★
Integration neuer Datenbank-elemente in bestehende Datenmodelle (z.B. NAVTEQ, Teleatlas).	Bislang noch nicht gelöst. Bestehende Konnektivitäten der Knoten und Kanten sind zu berücksichtigen.	★
Dienste		
Intermodales Routing	Bislang gibt es keinen inter-modalen Router, der auf Grundlage eines einheitlichen Bewertungskriteriums Reiseinformationen zusammenstellt, die auf einem einheitlichen Datenmodell aufbauen.	★
Betreibermodelle / Geschäftsmodelle		
Betreibermodelle / Geschäftsmodelle	Geeignete Betreiber- und Geschäftsmodelle mit einer PPP haben sich bislang noch nicht marktfähig durchgesetzt.	★

Tabelle 6-1: Forschungs- und Entwicklungsbedarf

6.3 Handlungsbedarf

Ableitend aus der in **Tabelle 6-1** dargestellten Bewertung der entwickelten und angewandten FTD-Verfahren sollen nachfolgend die Aspekte hervorgehoben werden, die vorrangig weiterzuentwickeln sind, da sie einen deutlichen Beitrag zur Qualitätssteigerung innerhalb der FTD-Funktionskette liefern können.

1. Automatische Erkennung der Verkehrsmittelwahl im mobilen Endgerät

Beschreibung:

Bei der Bereitstellung eines Lotsendienstes im Verkehr ist die Erkennung der Verkehrsmittelwahl des Nutzers sehr wichtig. Verkehrsinformationen sollen den Nutzern möglichst ohne Eingaben am mobilen Endgerät automatisiert übermittelt werden. Es ist daher anzustreben, dass die Verkehrsmittelwahl automatisch erkannt wird. Lösungsmöglichkeiten hierzu wurden in **Kapitel 3.4.2** aufgezeigt. Dem zu Grunde liegt eine systematische Auswertung des Bewegungsprofils mit den Kennwerten Beschleunigung, Geschwindigkeit und Drehrate. Bislang konnten diese Kennwerte nicht mit den derzeit verfügbaren mobilen Endgeräten erfasst werden. Eine systematische Analyse typischer Bewegungsmuster von Fußgängern, Radfahrer, Autofahren oder Verkehrsteilnehmern in Bussen und Bahnen war bislang nicht in ausreichendem Umfang möglich.

Voraussetzung:

Mobile Endgeräte mit verbesserter Ortungskomponente, die eine Erfassung der Kennwerte Beschleunigung, Geschwindigkeit und Drehrate ermöglichen.

Weitergehender Nutzen:

Verfahren der automatisierten Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren bzw. des elektronischen Fahrscheins (e-Ticketing) werden dadurch unterstützt.

2. Automatisierte Klassenbildung von Referenzganglinien im Motorisierten Individualverkehr für besondere Situationen (z.B. Großveranstaltungen, regelmäßig auftretende Störungen)

Beschreibung:

Detektordaten im Straßennetz (Zählwerte, Belegungsgrade) und mobil gewonnene Daten (Geschwindigkeit) werden für einzelne Zeitintervalle erhoben. Dabei können, je nach Tageszeit und Wochentag, an einzelnen Erfassungsstellen ähnliche Ausprägungen der Kennwerte festgestellt werden. Es werden daher Referenzganglinien für so genannte Referenzklassen (Mo, Di, Mi, Do, Fr, Sa, So) gebildet (vgl. **Kapitel 3.6.3**). Es gibt Situationen im Motorisierten Individualverkehr, die vom typischen Verlauf der Kennwertausprägung der bislang definierten Referenzklassen abweichen. So kann es beispielsweise sein, dass in Folge einer regelmäßigen Großveranstaltung (z.B. Fußballspiel) ein städtischer Bereich gesperrt ist, und daher auf Umleitungsstrecken ein erhöhtes Verkehrsaufkommen resultiert. Diese, für die bislang gebildeten Referenzklassen untypischen Ereignisse, können derzeit nicht zugeordnet werden. Es wird daher die Entwicklung eines Ver-

fahrens empfohlen, das die bislang nicht zu Referenzklassen zugeordneten Detektorganglinien und Geschwindigkeitganglinien analysiert, und dadurch regelmäßig erkennbare besondere Ausprägungen in neuen Referenzklassen zusammenfasst. Der Vorteil einer verfeinerten Klassenbildung ist eine bessere Erkennung von spezifischen Situationen, auf die mit unterschiedlichen Maßnahmen des Verkehrsmanagements reagiert werden kann.

Voraussetzung:

Die Erfassung von Detektordaten und Geschwindigkeitsinformationen auf einzelnen Streckenabschnitten muss im Online-Betrieb erfolgen. Darauf aufbauend können die Kennwerte über einen längeren Zeitraum systematisch analysiert werden.

3. Ermittlung von Reisezeitverlusten in Streckenabschnitten aus Daten haltelinien-naher Detektoren

Beschreibung:

In vielen Städten werden verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerungen eingesetzt. Dabei werden an den Knotenpunktzufahren Detektoren genutzt, die das Verkehrsaufkommen und Zeitlücken zwischen Fahrzeugen ermitteln, um dadurch eine optimierte, an die Verkehrssituation angepasste Signalsteuerung vornehmen zu können. Da die Detektoren an vielen Signalanlagen im Straßennetz zu finden sind, ist es wünschenswert, wenn die Daten auch zur Ableitung der Verkehrssituation in den Knotenpunktzufahrten genutzt werden könnten. Es sollte daher ein Verfahren entwickelt werden, das die Kennwerte Auslastungsgrad, Zählwert, Freigabezeit und die Entfernung des Detektors von der Haltelinie für ein definiertes Zeitintervall (z.B. 15 Minuten) berücksichtigt.

Voraussetzung:

Die Kennwerte Auslastungsgrad, Zählwert, Freigabezeit müssen online von den Signalanlagen an einen zentralen Verkehrsrechner übertragen werden. Das Verfahren sollte keine weiteren Softwaremodule in den LSA-Steuergeräten erfordern, da hierdurch Kosten entstehen und die Steuergeräte zusätzlich durch einen weiteren Prozess belastet werden.

4. Automatische Erkennung der genutzten ÖV-Linie und Kursnummer

Beschreibung:

Befindet sich ein Verkehrsteilnehmer in einem Fahrzeug des Öffentlichen Verkehrs, ist für die korrekte Erstellung von individuellen Verkehrsinformationen die Ermittlung der ÖV-Linie und Kursnummer wichtig. Neben der gezielten Information können daraus auch Echtzeitfahrplandaten erstellt werden, indem ein Vergleich der Ist-Ankunftszeit mit der Soll-Ankunftszeit von Fahrzeugen an Haltestellen durchgeführt wird. Bislang wurde ein manuelles Verfahren umgesetzt, bei dem vor Reiseantritt eine feste Route im System hinterlegt wird, aus der die voraussichtlich genutzte ÖV-Linie und die Kursnummer hervorgeht. Eine automatisierte Erkennung der Linie könnte unter Weiterführung des in **Kapitel 3.7.2** beschriebenen Verfahrens erfolgen. Darüber hinaus könnten Busse und

Bahnen mit Kommunikationseinrichtungen ausgerüstet werden (z.B. Bluetooth, WLAN oder RFID), die die Fahrzeugkennung an das Mobiltelefon der Verkehrsteilnehmer übertragen, wodurch die Identifikation der gewählten Linie und der Kursnummer deutlich vereinfacht würde.

Voraussetzung:

- Ortungsfunktion innerhalb von Fahrzeugen des Öffentlichen Verkehrs.
- ÖV-Datenmodell mit Sollfahrplan.

Weitergehender Nutzen:

Verfahren zur Abrechnung mit einem elektronischen Fahrscheins (e-Ticketing) könnten unterstützt werden.

5. Ermittlung neuer Datenbankelemente für Fußgänger und Radfahrer

Beschreibung:

In **Kapitel 3.8** ist ein Verfahren beschrieben, mit dem automatisiert aus mehrfach erhobenen Bewegungsspuren in einem Bereich auf neue Fußgänger- und Radwege geschlossen werden kann. Dieses Verfahren wurde in der bisherigen zweidimensionalen Ausprägung erfolgreich umgesetzt und getestet. Innerhalb von Gebäuden kommt es häufig vor, dass öffentliche Wege in verschiedenen Ebenen vorzufinden sind. Diese Informationen sind für Lotsendienste ebenfalls von Bedeutung. Daher wird eine Weiterentwicklung des Verfahrens mit einer Einbeziehung von Höhenangaben empfohlen.

Darüber hinaus ist die Integration neuer Datenelemente in ein bestehendes Datenmodell unter Berücksichtigung bestehender Konnektivitäten der Knoten und Kanten nicht gelöst.

Voraussetzung:

- Korrekte Positionsbestimmung mit Höhenermittlung.

Weitergehender Nutzen:

Die Vermarktung der gewonnenen neuen Datenbanken erzeugen neue Einnahmequellen.

6. Entwicklung von Diensten

Die in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren der „Floating Traveller Data (FTD)“ sind die Grundlage der eigentlichen Lotsendienste. Bislang ist ein verkehrsmittelübergreifender Lotsendienst nicht am Markt zu finden. Dabei sind neben den Nutzeranforderungen auch technische Fragen zum intermodalen Routing zu beantworten. Ein erster Prototyp wurde im Projekt COX **[MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002]** in Darmstadt für eine Reise-Relation, einem ca. 2 km lange Strecke zwischen dem Darmstädter Hauptbahnhof und dem Luisenplatz, aufgebaut. Auf diesem Korridor wurde die Verkehrslage im MIV und ÖV erfasst und dem Reisenden die Reisezeiten für die verschiedenen Verkehrsmittel bis zum Ziel angezeigt. Ein für die Öffentlichkeit nutzbarer Dienst existiert bislang nicht.

7. Betreibermodelle / Geschäftsmodelle

Bislang gibt es noch kein geeignetes Betreiber- und Geschäftsmodell unter Einbeziehung öffentlicher Aufgabenträger und privater Unternehmen, bei denen die hoheitliche Verantwortung zur Verkehrssteuerung und Verkehrslenkung in Einklang mit Interessen von Unternehmen gebracht werden. Mögliche Lösungsansätze, die unter dem Begriff der Public-Private-Partner-Ship (PPP) zusammengefasst sind, wurden in **Kapitel 5.1** beschrieben. Es wurden Aspekte des städtischen und regionalen Verkehrsmanagements berücksichtigt. Die Weiterentwicklung und Umsetzung möglicher Betreibermodelle sind eine wesentliche Voraussetzung für den dauerhaften und wirtschaftlichen Betrieb von individuellen Lotsendiensten.

7 Ausblick

Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Gesamtkonzept der „Floating Traveller Data (FTD)“ ist eine Grundlage für mobile Lotsendienste im Verkehr. Durch eine Umsetzung der Technologien kann flächendeckend die Verkehrslage im MIV und ÖV im Online-Betrieb erhoben werden. Ende 2005 besaßen etwa 63 Millionen Bundesbürger (76% der Gesamtbevölkerung) ein Mobiltelefon [STAT. BUNDESAMT, 2005]. Der Informationsbedarf, vor allem im Verkehr, steigt beständig und Mobiltelefone werden immer leistungsfähiger. Es ist daher davon auszugehen, dass es technisch möglich sein wird, die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Verfahren der breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Bislang gibt es am Markt keinen verkehrsmittelübergreifenden Lotsendienst, der den Verkehrsteilnehmer zuverlässig über das aktuelle Verkehrsangebot informiert und ihm während seiner Reise bei Verkehrsstörungen Unterstützung bietet. Bei einer Integration des FTD-Ansatzes in ein Dienstangebot von Mobilfunkbetreibern besteht die Möglichkeit, dass automatisch eine flächendeckende Detektion von Verkehrszuständen kostengünstig erfolgen kann, da Besitzer von Mobiltelefonen zur Datenerfassung beitragen. Vor allem in städtischen Bereichen und auf Landstraßen besteht dadurch die Möglichkeit, verbesserte Aussagen zum Verkehrsfluss im Straßenverkehr geben zu können, ohne hohe Investitionen in stationäre Detektoren (z.B. Induktionsschleifen) zu tätigen. Bei einer hohen Marktdurchdringung der Verfahren auf Mobiltelefonen kann vollständig auf eine stationäre Detektion zur Verkehrslageermittlung verzichtet werden. So lange keine flächendeckende Einführung der FTD-Verfahren gewährleistet ist, sollte im Straßenverkehr eine Fusion der mobil erhobenen Daten mit Detektorwerten an Lichtsignalanlagen bzw. auf Autobahnen zur Plausibilitätsprüfung angestrebt werden.

An die Entwicklung der FTD-Verfahren muss ein nachhaltiges Geschäftsmodell geknüpft werden. Eine erfolgreiche Erprobung der Schlüsseltechnologien durch die Fusion der stationär generierten Daten (Datenerhebung bei öffentlichen Aufgabenträgern) und der FTD (Datenerhebung durch private Dienstanbieter) kann ein neuer Weg beschritten werden. Er bietet die Chance, Public-Private-Partnership zu fördern, da sowohl Daten öffentlicher Aufgabenträger als auch Daten von privaten Mobilitätsdienstleistern zusammengeführt werden, und beide von den „veredelten“ Daten profitieren. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Steuerungsstrategien des Verkehrsmanagement in Datenmodellen zu hinterlegen, um darauf aufbauend Reiseinformationen zu geben.

8 Zusammenfassung

Die flächendeckende und verkehrsmittelübergreifende Verkehrsdatenerfassung ist eine wesentliche Anforderung für die Bereitstellung von kollektiven und individuellen Informationsdiensten im Verkehr. Der finanzielle Aufwand für eine vollständige Detektion des Motorisierten Individualverkehrs (MIV) und des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) ist groß und daher nicht denkbar. In der vorliegenden Arbeit wird daher ein neuer Lösungsweg beschrieben, bei dem Mobilfunkteilnehmer zur Verkehrsdatengenerierung im MIV und ÖV beitragen. Dazu werden die mit handelsüblichen mobilen Endgeräten (Mobiltelefon mit Ortungsmodul) gespeicherten Bewegungsinformationen anonymisiert ausgewertet. Der Verbreitungsgrad von Mobiltelefonen ist groß so dass es möglich wird, flächendeckend Aussagen zum aktuellen Verkehrsgeschehen zu treffen, wenn die FTD-Verfahren eingeführt werden. Je nach Verkehrsmittelwahl des Reisenden werden spezifische verkehrstechnische Verfahren aktiviert, aus denen zentralseitig Rückschlüsse zur Verkehrslage im jeweiligen Verkehrsmittel gezogen werden können. Die entwickelten Verfahren werden unter dem Begriff der „Floating Traveller Data (FTD)“ zusammengefasst. Die einzelnen FTD-Verfahren wurden in ein Gesamtkonzept eingebunden. In einem Feldversuch von Oktober 2004 bis Februar 2005 wurden die FTD-Verfahren in Darmstadt erprobt. Die folgenden Erkenntnisse konnten aus den Tests gewonnen werden:

FTD-Verfahren auf mobilen Endgeräten

Grundlage aller FTD-Verfahren ist die Positionsbestimmung des Verkehrsteilnehmers. Es werden dazu mobile Endgeräte mit einem Ortungsmodul ausgestattet. Das derzeitige Entwicklungsstadium des Ortungsmoduls⁷ ermöglicht eine Positionsbestimmung mit GPS, Bluetooth, WLAN und GSM. Dadurch wird es möglich, die eigene Position innerhalb von Gebäuden mit einer Genauigkeit von 5 bis 10 Metern zu berechnen. Die vom Ortungsmodul ermittelten Positionsdaten werden dann an die eigentlichen FTD-Verfahren zur Weiterverarbeitung übergeben:

- Erkennung der Verkehrsmittelwahl

Bei der automatisierten Erkennung der Verkehrsmittelwahl werden die Bewegungsinformationen (Geschwindigkeit, Beschleunigung und Drehrate) fortdauernd ausgewertet. Für jede Klasse der Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, Nutzer von Bussen und Bahnen, Autofahrer) gibt es typische Bewegungsmuster, die die Erkennung des genutzten Verkehrsmittels ermöglichen können. In der vorliegenden Arbeit wurden Kennwertebereiche der Bewegungsmuster für die jeweilige Verkehrsmittel ermittelt. Allerdings ist eine vollautomatische Ermittlung der Verkehrsmittelwahl bislang noch nicht möglich. Ziel zukünftiger Forschungsaktivitäten sollte es u.a. sein, eine systematische Analyse der verschiedenen Bewegungsmuster durchzuführen. In welchem Maße ein Verkehrsteilneh-

⁷ Das Ortungsmodul wurde vom ZIV-Zentrum für integrierte Verkehrssysteme in Darmstadt im Rahmen des Projekts COX [MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002] entwickelt. Die Entwicklung ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

mer seine Richtung verändert (Drehrate), ist dabei eine wichtige Kenngröße. Derzeit liefern die Ortungsmodule keine zuverlässige Information dazu, da bislang so genannte „Gyrometer“ nicht in mobilen Endgeräten eingesetzt werden. Derzeit ist daher eine manuelle Festlegung der Verkehrsmittelwahl am mobilen Endgerät erforderlich.

- Datenreduktion durch Ausdünnung der Bewegungsspuren

In dieser Arbeit wurde ein effizientes Verfahren zur Datenreduktion durch Ausdünnung der Bewegungsspuren entwickelt. Im Individualverkehr (MIV, Fußgänger und Radfahrer) werden nur die Positionsdaten an eine Zentrale versendet, die zur Abbildung des geometrischen Verlaufs einer Strecke erforderlich sind. Nur bei einer signifikanten Richtungsänderung werden Positionsdaten gespeichert. Treten deutliche Veränderungen in der Geschwindigkeit auf, werden die Positionen ebenfalls gespeichert. Im ÖV werden ausschließlich Positionen an eine Zentrale übertragen, an denen Haltezeiten größer 10 Sekunden (z.B. an Haltestellen) auftreten.

Die Bewegungsspuren konnten durch das entwickelte Verfahren um ca. 93% reduziert werden. Die Kommunikationskosten werden dadurch erheblich reduziert.

FTD-Verfahren – Motorisierter Individualverkehr (MIV)

Die von mobilen Endgeräten unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer in einer Zentrale eingehenden Daten werden zunächst durch ein „MapMatching-Verfahren“ (Modul der PTV AG) einem idealisierten Straßenmodell mit einzelnen Streckenabschnitten zugeordnet. Das Resultat sind Einzelgeschwindigkeiten, die auf den jeweiligen Streckenabschnitten gefahren wurden. Ob diese Einzelergebnisse jedoch das tatsächliche Verkehrsgeschehen korrekt wiedergeben, bedarf einer eingehenden Prüfung. In dieser Arbeit wurden daher Verfahren entwickelt, bei denen die Plausibilität von mobil erhobenen Daten durch einen Vergleich mit Detektordaten im Straßennetz (stationäre Datenerfassung) durchgeführt wird. Im einzelnen wurden die folgenden Verfahren entwickelt:

- Aufbereitung stationär erhobener Daten:

An vielen innerstädtischen Straßen liefern Detektoren an Lichtsignalanlagen Informationen zum Verkehrsaufkommen. Die fortdauernde Datensammlung ermöglicht den Aufbau einer sehr großen Datenbasis (große Grundgesamtheit). Diese Daten können durch regelmäßige Auswertungen genutzt werden, um Rückschlüsse auf tageszeitliche Schwankungen und Störungen im Verkehrsablauf zu ziehen. Es wurde ein Verfahren entwickelt, das den Aufbau typischer Belastungsganglinien (Referenz) für unterschiedliche Tagesartklassen ermöglicht. Durch den Vergleich aktueller Belastungswerte mit der Referenz wird die Erkennung von Störungen zuverlässig ermöglicht.

- Aufbereitung mobil erhobener Daten:

Die Anzahl von Verkehrsteilnehmern, die einen Streckenabschnitt mit mobiler Erfassungseinrichtung befahren, ist entscheidend für eine zentralenseitige Plausibilitätsprüfung der eingehenden Geschwindigkeitswerte. Einzelmesswerte sind zunächst als nicht vertrauenswürdig einzuschätzen. Um eine Aussage zur Vertrauenswürdigkeit der eingehenden Daten treffen zu können, wurde in dieser Arbeit ein FTD-Bewertungskennwert eingeführt. Eingangsgrößen des Bewertungsverfahrens sind die Anzahl der eingegangenen Messwerte innerhalb eines Streckenabschnitts und die sich daraus ergebende Standardabweichung in einem Zeitintervall. Ergänzend wird geprüft, ob sich die mittleren Geschwindigkeiten im betrachteten Streckenabschnitt (momentane Geschwindigkeit) innerhalb eines für die Tageszeit typischen Bereichs befinden.

- Fusion mobil und stationär erhobener Daten:

Immer dann, wenn die Plausibilität der mobil erhobenen Daten nicht eindeutig festzustellen ist (schlechter FTD-Bewertungskennwert), wird eine Zustandsprüfung der Verkehrssituation durch einen Online-Vergleich mit Detektordaten eines Streckenabschnitts durchgeführt. Wurden beispielsweise für ein Zeitintervall signifikante Geschwindigkeitsänderungen gegenüber der mobil erhobenen Referenz festgestellt und treten an den Detektoren ebenso Veränderungen vom typischen Verkehrsaufkommen auf, so ist dies ein Anzeichen für eine Störung im Streckenabschnitt. Die mobil erhobenen Daten sind somit als plausibel zu bewerten.

Das entwickelte Verfahren wurde in mehreren Testfahrten erfolgreich erprobt. Eine ausführliche Dokumentation ist in **Anlage 9.7.4** beigefügt. Das technische Lösungskonzept zur Datenfusion ist so ausgelegt, dass weit verbreitete verkehrstechnische Standards aufgegriffen werden und möglichst ohne weitere kostenintensive Datenerfassungseinrichtungen die Ermittlung der Verkehrslage ermöglicht wird.

Derzeit werden Referenzganglinien für Zählwerte und Geschwindigkeitswerte für einzelne Tagesklassen (Mo, Di, Mi, Do, Fr, Sa, So) angelegt. Eine Verfeinerung der Klassen, z.B. mit einer Differenzierung in Schulferien oder für Großveranstaltungen, würde das Verfahren weiter optimieren.

FTD-Verfahren – Öffentlicher Verkehr (ÖV)

Unabhängig vom Vorhandensein rechnergestützter Betriebsleitsysteme (RBL) tragen Verkehrsteilnehmer, ausgestattet mit mobiler Erfassungseinheit, zur Ermittlung von Fahrplanabweichungen von Bussen und Bahnen zuverlässig bei. Das entwickelte FTD-ÖV Verfahren wurde in Darmstadt auf einer Straßenbahnlinie erfolgreich getestet. Bewegungsinformationen von nur einem Endgerät sind ausreichend, um eine Online-Erfassung durchzuführen. Das Verfahren setzt voraus, dass die Liniennummer und Kursnummer der online erfassten Fahrt bekannt sind, damit zentralenseitig ein Soll-Ist-Vergleich des Fahrplans durchgeführt werden kann. In der derzeitigen Entwicklungsstufe wird vor Fahrtantritt eine Reiseplanung durchgeführt bei der festgelegt wird, zu welcher Uhrzeit der Verkehrsteilnehmer in ein Fahrzeug des ÖV (mit Linie und Kursnummer) einsteigt. Denkbar wäre auch eine automatisierte Erkennung der Linie und Kursnummer. Hierzu ist eine rückblickende Betrachtung des zurückgelegten Linienweges erforderlich. Ein Verfahren hierzu wurde in **Kapitel 3.7.2** beschrieben.

FTD-Verfahren – Nichtmotorisierter Verkehr (Radfahrer, Fußgänger)

Ziel des FTD-Prozesses für Fußgänger und Radfahrer ist es, Routinginformationen unter Berücksichtigung von Fußwegen bzw. Radwegen bereitzustellen. Von Datenbankanbietern der Fa. NAVTEQ und Teleatlas können nur Verkehrsnetze bezogen werden, in denen das Straßennetz aufgenommen wurde. Fußgänger und Radwege, die sich nicht unmittelbar an einer Straße befinden, werden bislang nur selten in den Datenmodellen berücksichtigt. Es wurde daher ein FTD-Verfahren entwickelt, bei dem die Bewegungsinformationen unterschiedlicher mobiler Endgeräte von Fußgängern und Radfahrern automatisiert ausgewertet werden, um neue Datenbankelemente (Fußwege und Radwege) zu identifizieren. Das Verfahren wurde für einen Bereich der Darmstädter Innenstadt erfolgreich erprobt. Neue Fußwege konnten durch das Verfahren identifiziert werden. Bislang nicht umgesetzt ist die Integration in bestehende Datenmodelle. Hierzu sind bestehender Konnektivitäten von Knoten und Kanten der Datenmodelle zu berücksichtigen und automatisiert anzupassen.

Durchdringungsraten

Die Qualität von Verkehrsinformationen hängt stark von der Detektionsrate, der Aktualität und der Funktionsfähigkeit der Datenerzeugung und Datenübertragung ab. Da die Verkehrsnetze allerdings unterschiedlich stark belastet sind, ist eine pauschale Aussage zur Durchdringungsrate nur bedingt korrekt. Es wurden in dieser Arbeit Aussagen zur Durchdringungsrate in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf Straßenabschnitten getroffen. Bei Straßen, die von ca. 3000 Kfz/h befahren werden, müssen etwa 1 % der Fahrzeuge mit mobilen Erfassungsgeräten ausgestattet sein. Auf schwach befahrenen Straßen (ca. 250 Kfz/h) sind ca. 10% der Fahrzeuge auszurüsten.

Für die Region Frankfurt RheinMain wurde in dieser Arbeit eine Abschätzung des Ausstattungsgrades vorgenommen, um das gesamte strategische Verkehrsnetz (Verkehrsnetz mit maßgeblicher regionaler Verbindungsfunktion) im Online-Betrieb zu detektieren.

Um eine vollständige Detektion der Verkehrslage im strategischen Netz der Region Frankfurt RheinMain zu erzielen, müssten ca. 650 Fahrzeuge mit mobiler Erfassungseinheit gleichzeitig verkehren. Die Detektion des gesamten Streckennetzes über 24 Stunden erfordert eine höhere Fahrzeuganzahl mit mobiler Erfassungseinheit. Diese hängt von der mittleren Gesamtfahrzeit eines Fahrzeugs pro Tag im Streckennetz ab.

Im ÖV müssten ca. 1.500 Endgeräte in Bussen und Bahnen eingesetzt werden.

Betreibermodelle im Rahmen einer Public-Private-Partnership (PPP)

Ein wesentlicher Aspekt bei der Umsetzung neuer Technologien zur Datenerfassung und Datenaufbereitung zur Erzeugung kollektiver und individueller Verkehrsinformationen sind belastbare Betreibermodelle. Der Grund dafür liegt in der erforderlichen Kooperation einer Vielzahl von Institutionen wie Kommunen, Verkehrsunternehmen, Einrichtungen der Bundesländer und ggf. privater Unternehmen. In der vorliegenden Arbeit wurde ein mögliches Betreibermodell vorgestellt, bei dem jeder Partner seine eigentlichen Stärken einbringen kann. Als Betreiber eines individuellen Verkehrsinformationsdienstes werden Telekommunikationsunternehmen gesehen, da sie die Kompetenz bei der Vermarktung von standortbasierten Diensten (LBS-Location-Based-Services) besitzen. Aus Verkehrsinformationen allein können keine ausreichenden Einnahmen generiert werden, die den technischen Aufwand der Datenerfassung decken. Daher sind Verkehrsinformationsdienste mit weiteren Dienstmerkmalen wie z.B. eTicketing (elektronischer Fahrschein) und eCouponing (elektronischer Warengutschein von Handelsketten) zu ergänzen. Verkehrsinformationsdienste stellen den kostengünstigen Einstieg in die Nutzung von Location-Based-Services dar. Die Finanzierung erfolgt über die Mehrwertdienste.

Aus Sicht Öffentlicher Aufgabenträger müssen Aspekte der Verkehrssteuerung und Verkehrslenkung in individuellen Verkehrsinformationsdiensten abgebildet werden können. In dieser Arbeit wurde ein möglicher Datenfluss zwischen einem privaten Dienstbetreiber und öffentlichen Aufgabenträgern beschrieben, bei dem hoheitliche Aufgaben der Verkehrssteuerung Berücksichtigung finden. Die Weiterentwicklung und Umsetzung möglicher Betreibermodelle sind eine wesentliche Voraussetzung für den dauerhaften und wirtschaftlichen Betrieb von individuellen Lotsendiensten.

Rechtliche Aspekte / Datenschutz

Mit zunehmender Verbesserung der Lokalisierungstechnologien ist es möglich, den Aufenthaltsort des Handynutzers immer genauer zu bestimmen. Damit wird ein neuer Teil der Privatsphäre für Außenstehende zugänglich. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz der fortdauernden Aufzeichnung von Bewegungsmustern zur Ableitung der aktuellen Verkehrslage ermöglicht – bei missbräuchlicher Verwendung – die Erstellung von Nutzerprofilen. In diesem Kontext sind eine Vielzahl von datenschutzrechtlichen Risiken zu beachten. Vor dem Hintergrund der technologischen Möglichkeiten und nicht zuletzt auch um das Vertrauen der Nutzer von Location-Based-Services (LBS) zu stärken, gilt daher der datenschutzrechtlichen Ausgestaltung standortbasierter Dienste ein besonderes Augenmerk. Die Aufgabe des

Datenschutzrecht ist dabei der Schutz personenbezogener Daten – also auch personalisierter Standortdaten.

Die Übertragung, Speicherung und Nutzung personenbezogener Daten werden durch die Europäische Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation **[EU, 2005]** und das deutsche Telekommunikationsgesetz **[TKG, 2004]** geregelt. Die Übertragung, Speicherung und Auswertung personenbezogener und vom Standort abhängiger Daten ist durch die beiden gesetzlichen Richtlinien eindeutig geregelt. Die Daten dürfen anonymisiert oder nach Einwilligung der Nutzer ausgewertet werden. Die in dieser Arbeit beschriebenen FTD-Verfahren können aus rechtlicher Sicht ohne Einschränkung umgesetzt werden.

9 Anlagen

9.1 Literaturverzeichnis

- [BAST, 1999] **Bundesanstalt für Straßenwesen**
"Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen – MARZ",
Bergisch-Gladbach, 1999
- [BAST, 2002] **Bundesanstalt für Straßenwesen**
"Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen – TLS 2002",
Bergisch-Gladbach, 2002
- [BAST, 2003] **Bundesanstalt für Straßenwesen**
"Straßenverkehrszählung (SVZ) 2000",
Bergisch-Gladbach, 2003
- [BECKER, 2005] **Becker J, Breser C.**
"Data Mining im Verkehrswesen",
Internationale Verkehrswesen, 2005
- [BOGENBERGER, 2005] **Bogenberger, K., Konhäuser, P.**
"Verkehrsmanagement der Zukunft, INVENT – Verkehrsmanagement 2010"
Tagungsband der HEUREKA 2005, S. 91-103
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Köln 2005
- [BOLTZE, 1994] **Boltze, M., e.a.**
"Parkveralten und Wirksamkeit des Parkleitsystems in Frankfurt am Main" in Straßenverkehrstechnik 1994, Nr. 1, S29-S.34
Darmstadt, 1994
- [BOLTZE, REUßWIG, 2005] **Boltze, M., Reußwig, A.,**
"Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation"
Schlussbericht zum FE 03.353/2002/DGB aus dem Forschungsprogramm Stadtverkehr des BMVBW,
Darmstadt, 2004.
- [BRANNOLTE, 1998] **Brannolte U., Kraus, T.**
"Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen"
Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät für Bauingenieurwesen.
Forschungsprojekt gefördert durch das BMBF – Schlussbericht
Weimar, Juli 1998

-
- [BREITENBERGER, 2004] **Breitenberger, S., Grüber, B., Neuherz, M.**
"Extended Floating Car Data – Potenziale für die
Verkehrsinformation
und notwendige Durchdringungsraten"
Straßenverkehrstechnik, 10/2004
- [BREITENSTEIN, 1978] **Breitenstein, J.**
"Analyse und Weiterverfolgung gemessener Zeitreihen als
Entscheidungsgrundlage für
Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen"
Schriftenreihe Forschung Straßenbau und
Straßenverkehrstechnik,
Heft 247, Bonn, 1978
- [BRILON, 1995] **Brilon, W.**
"Wartezeit an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen"
in Straßenverkehrstechnik 1995, Nr. 11, Bochum, 1995
- [BRILON, 1999] **Brilon, W.**
"Grundlagen der Verkehrstechnik"
Vorlesungsskript des Lehrstuhls für Verkehrswesen,
Ruhr-Universität Bochum
Bochum, 1999
- [BRILON, SCHNABEL, 2003] **Brilon, W., Schnabel, W**
"Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf
Hauptverkehrsstraßen"
in „Straßenverkehrstechnik“, Heft 1 / 2003
- [BRONSTEIN, 2003] **Bronstein, I., Grosche, G., Zeidler, E.**
"Teubner Taschenbuch der Mathematik"
Teubner-Verlag; ISBN-Nr.: 3815420016
2003
- [BMVBW, 2003] **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen,
Wissenschaftlicher Beirat,**
„Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Telematik im
Verkehr“, Originalschrift
Berlin, 2003
- [BMVBW, 2005] **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen**
„Leitfaden Verkehrstelematik, Hinweise zur Planung und
Nutzung in Kommunen und Kreisen“, unveröffentlichte
Ausgabe 2005 erstellt durch die Technische Universität
Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik
(Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze)
Darmstadt, 2005
-

- [BUSCH, 2004-1]** **Busch, F., Hoyer, R., Keller, H., Reupke, H., Riegelhuth, G., Zackor, H.**
"Telematikanwendungen im Straßenverkehr – Stand und Perspektive; Teil 2"
in „Straßenverkehrstechnik“, 7/2004
- [BUSCH, 2004-2]** **Busch, F., Glas, F., Bergmann, E.**
"Dispositionssysteme als FCD-Quellen für eine verbesserte Verkehrslagerekonstruktion in Städten",
Straßenverkehrstechnik, 9/2004
- [DAT-BERLIN, 2005]** **Datenschutz Berlin**
"Telekommunikation und Medien"
Absatz 5.1, Telekommunikationsdienste
<http://www.datenschutz-berlin.de/jahresbe/04/teil5.htm>
- [EU, 2005]** **Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2002**
"Europäische Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation"
Richtlinie 2002/58/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2002 über die Verarbeitung personenbezogener Daten und den Schutz der Privatsphäre in der elektronischen Kommunikation (Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation)(ABl. EG L 201 vom 31.07.2002, S. 37) .
http://www.datenschutz-berlin.de/recht/eu/rv/tk_med/tkdsr_de.htm
- [DLR, 2005]** **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)**
Institut für Verkehrsforschung
"Taxis als Staumelder, Floating-Car-Daten (FCD) mittels Global Position System (GPS) erfassen"
http://www.dlr.de/vf/forschung/projekte/taxi_fcd
- [EVERS, 1998]** **Evers, H., Kasties G.**
"Kompendium der Verkehrstelematik"
TÜV-Rheinland, TÜV-Verlag ISBN 3-8249-0421-7, Köln 1998
- [FGSV, 1991]** **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen**
Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit
"Merkblatt für Detektoren für den Straßenverkehr", Köln, 1991
- [FGSV, 1992]** **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen**
Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit
"Richtlinie für Lichtsignalanlagen (RiLSA)", Köln, 1992

- [FGSV, 1996] **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen**
Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit
"Hinweise zu Parkleitsystemen – Konzeption und Steuerung",
Köln, 1996
- [FGSV, 2001] **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen**
"Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
(HBS)", Köln, 2001
- [FGSV, 2003] **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen**
Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit:
"Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in
verkehrstechnischen Anwendungen", Köln, 2003
- [GOLEM, 2005] **GOLEM, IT-News für Profis**
"Navigations-Handy macht Pkw zum mobilen Staumelder
– Hessen will Verkehrsfluss besser regeln"
<http://www.golem.de/0501/35789.html>
- [HECK, 2003] **Heck, B.**
„Rechenverfahren und Auswertemodelle in der
Landesvermessung“, Wittwer Verlag. 3. Auflage, 2003.
- [HESSEN, 2005] **„Staufreies Hessen - Mit DIANA geht's los -**
Ministerpräsident Koch stellt Pilotprojekt für brandaktuelle
Verkehrsinformationen vor“ [http://www.hessen-egovernment.de/](http://www.hessen-egovernment.de/dynasite.cfm?dssid=66&dsmid=3462&dspaid=13822)
[dynasite.cfm?dssid=66&dsmid=3462&dspaid=13822](http://www.hessen-egovernment.de/dynasite.cfm?dssid=66&dsmid=3462&dspaid=13822)
Hessisches Ministerium des Innern;
Wiesbaden, 2005
- [HERZ, 1992] **Herz, R., Schlichter, H. G., Siegener, W.**
„Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner“
Werner-Verlag, 2. Auflage
Düsseldorf, 1992
- [HCM, 2000] **Highway Capacity Manual, HCM 2000**
Transportation Research Board
National Research Council
Washington D.C., 2000
- [HOOPS, 1999] **Hoops, M., Kates R. Keller H.**
"Verfahren zur Bewertung und Verfahren zur Optimierung von
Verkehrsstörungserkennungsverfahren."
Offenlegungsschrift DE 199 37894.0, Deutsche Patentamt,
München, 1999.

- [HUBER, 2001]** **Huber, W.**
Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der TU
München
"Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von
Verkehrsinformationen"
Dissertation
München, Juli 2001
- [JANKO, 1994]** **Janko, J.**
"Probleme der Reisezeitprognose in einem Leitsystem für den
Straßenverkehr", Dissertation TU Berlin,
Berlin 1994
- [KELLER, 1987]** **Keller, H., Hampe, H., Wagner, H.**
"Zeitliche Trends im Verkehrsablauf auf Autobahnen."
Schriftenreihe Forschung Straßenbau und
Straßenverkehrstechnik, Heft 494,
Bonn, 1987.
- [KIESLICH, 2000]** **Kieslich, Wolfgang**
Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der TU
München
"Betriebsleitsystem im ÖPNV des ländlichen Raumes"
Dissertation
München, April 2000
- [LEHMANN, 2001]** **Lehmann, H., Willenbrock, R., Zemin, F., Paulsen, R.,
Schönewolf, W.**
"Verkehrsmusteranalyse innerörtlicher Netze mittels Floating
Car Data",
Straßenverkehrstechnik, 9/2001
- [LEHNHOFF, 2005]** **Lehnhoff, N.**
"Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch
erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen",
Dissertation, Heft 34,
Institut für Verkehrswissenschaft, Straßenwesen und
Städtebau, Universität Hannover;
Hannover, 2005
- [LUEBBERT, 1997]** **Luebbert, D.**
"Statistikzusammenfassungen und Methodentexte"
<http://www.luebbert.net/uni/index.php>
Köln, 1997

-
- [MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002]** **Multimediainitiative des Landes Hessen**
getragen durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung und der Deutschen Telekom AG; T-Systems GEI, t-info, ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme an der TU Darmstadt:
„Grobkonzept COX Positions- und situationsbezogener Lotsendienst“;
Schlussbericht (unveröffentlicht), Darmstadt 2002.
- [MÜCK, 2002]** **Mück, J.:**
„Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren.“
Tagungsband der Heureka 2002, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2002.
- [OCIT, 2002]** **OCIT Developer Group (ODG)**
„OCIT-Outstations, Einführung in das System“
http://www.ocit.org/documents/OCIT-O-System_V1_1_A01.pdf
2002
- [PETERS, 2005]** **Peters, J.**
„Qualitätsüberwachung und Mustererkennung verkehrstechnischer Zeitreihen“; momatec GmbH
Tagungsband der Heureka 2005, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2005.
- [PTV, 2005]** **PTV-AG, Karlsruhe**
„PTV NaviGuide“
http://www.ptv.de/cgi-bin/mobility/mob_naviguide.pl
- [RINDSFÜSER, 2002]** **Rindsfuser, G., Emig, J., Gericke, F., Möltgen, J., Portele, C., Stiele, P., Zagel, B.**
„Verwendung von Geoinformationssysteme in der Verkehrsplanung“ Tagungsband der Heureka 2002, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2002.
- [RMV, 2004]** **Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH**
„RMV in Zahlen, statistische Daten zum RMV“
<http://www.rmv.de/coremedia/generator/RMV/WirUeberUns/RMVinZahlen>
Hofheim, 10/2004
-

- [RUDY, 2005]** **Forschungsprojekt RUDY**
„Regionale Unternehmensübergreifende Dynamisierung von Fahrplaninformation, Buchung und Betrieb im ÖPNV“ gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Berlin 2005
http://www.pnvregion.de/seiten/index.php4?content=projekt&projekt_id=10
- [SCHNABEL, LOHSE, 1997]** **Schnabel, W., Lohse, D.**
„Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung“, Verlag für Bauwesen, 1997
- [SIEGENER, 1980]** **Siegener, W., Schmitt, W.**
„Prognose von Verkehrsmengen durch aktuelle Fortschreibung von Langzeiterwartungskennwerten“ in „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 316;
Bonn Bad-Godesberg, 1980
- [SPEER, 2004]** **Speer, M.**
„Die Physik des Staus“; Frankfurter Allgemeine Zeitung, Teil „Technik und Motor“; Ausgabe vom 14. September 2004, Nr. 214 / Seite T1.
- [STAADT, RETZKO, 1979]** **Stadt, Retzko**
„Untersuchung des Verkehrsablaufs an Engstellen mit Lichtsignalanlage“ und „Verkehrsablauf auf Straßen mit Lichtsignalanlagen“, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (Gelbe Reihe), Heft 268, Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 1979
- [STAT. BUNDESAMT, 2005]** **Statistisches Bundesamt Deutschland**
„Ausstattung privater Haushalte mit Informations- und Kommunikationstechnik“, Ergebnis der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2005;
<http://www.destatis.de/basis/d/evs/budtab2.php>
- [T-INFO, 2003]** **T-info München GmbH**
nicht veröffentlichtes Arbeitspapier, das im Projekt COX „Communication and Orientation eXpert) entwickelt wurde.
München Juni 2003
- [TKG, 2004]** **Deutsches Telekommunikationsgesetz (TKG)**
in der Fassung vom 22. Juni 2004
http://www.netlaw.de/gesetze/tkg_neu.htm

- [VDV, 1995] **Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)**
"Rahmenlastenheft Rechnergesteuertes Betriebsleitsystem
(RBL)"
Köln, Dezember 1995
- [VDV, 2001] **Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)**
"ÖPNV-Datenmodell 5.0 – Schnittstellen-Initiative, Dateiformat
für die Datenübertragung zwischen ÖPNV-Anwendungen,
Version 2.0"; Heft 452
Köln, April 2001
- [VOGT, 1999] **Vogt, D.**
„Akzeptanzuntersuchung von individuellen Mobilitätsdiensten“,
TU-Darmstadt / ZIV, Darmstadt 2003
- [VON DER RUHREN, 2000] **Von der Ruhren, S.**
„Verfahren zur Klassifizierung von Ganglinien“;
Stadt und Verkehrsmodelle,
Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der Rheinisch-
Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Univ.-Prof.
Dr.-Ing. Klaus J. Beckmann
Aachen, 2000
- [WEBSTER, 1958] **Webster, F.V.**
"Traffic Signal Settings. Road Research Technical"; Paper, No.
30, London 1958.
- [WILD, 1996] **Wild, D.**
"Die Prognose von Verkehrsstärken anhand klassifizierter
Ganglinien", Dissertation an der Fakultät für Informatik der
TH Karlsruhe, Karlsruhe 1996
- [WU, 1990] **Wu, N.**
"Wartezeit und Leistungsfähigkeit von Lichtsignalanlagen unter
Berücksichtigung von Instationarität und Teilgebundenheit des
Verkehrs."; Dissertation, Bochum 1990.

9.2 Bildverzeichnis

	Seite
Bild 1-1: Interesse an mobilen Diensten mit Ortsbezug [VOGT, 1999]	2
Bild 1-2: Einordnung des Themas FTD in das Konzept COX	4
Bild 1-4: Bewegungsspuren Radfahrer, Fußgänger, Straßenbahn an einem Beispiel in Darmstadt	7
Bild 1-5: Aufbau der Arbeit	11
Bild 2-1: Abbildung des Straßennetzes in einem Knoten-Kanten-Modell	20
Bild 2-3: Beispiel einer Fahrplanauskunft in Darmstadt (Quelle: www.rmv.de)	22
Bild 2-4: Detailinformationen einer Fahrplanauskunft im Öffentlichen Verkehr mit Ankunftszeit und Abfahrtszeiten an Haltestellen (Soll-Fahrplan).	23
Bild 3-1: Verfahrensablauf „Floating Traveller Data (FTD)“	45
Bild 3-3: Programm zur Erkennung der Verkehrsmittelwahl aus der Analyse von Bewegungsspuren; Beispielrechnung mit einer Pkw-Bewegungsspur.	54
Bild 3-7: Schematische Darstellung der Kommunikation [MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002]	67
Bild 3-8: Prinzipskizze der Fusion stationär und mobil erfasster Daten im Motorisierten Individualverkehr	69
Bild 3-9: Zählwerte eines Detektors in Darmstadt (Knotenpunkt Rheinstraße / Am Kavalleriesand); 7 Montage im Januar / Februar 2004 mit Mittelwertbildung	71
Bild 3-10: Gegenüberstellung von Detektordaten mit fehlerhaften Wertebereichen: Zählwerte $Z=0$ [Kfz/15 min] und Belegungsgrade $B=100$ [%] (hervorgehoben)	72
Bild 3-11: Erkennung fehlerhafter Detektorkennwerte (Zählwerte / Belegungsgrade) aus der Betrachtung aller Detektoren zweier benachbarter Knotenpunkte in Darmstadt am 9.2.2004	73
Bild 3-12: Gegenüberstellung einer Detektor-Referenzganglinie mit und ohne Erfassungsfehler (7 Montagsganglinien wurden erfasst)	78
Bild 3-13: MapMatching-Ergebnis einer Testfahrt (Fahrtrichtung Ost)	79
Bild 3-14: Gegenüberstellung einer Referenzganglinie (Kraftfahrzeuge je 15 Minuten) und Ganglinie mit einem Störfall	82
Bild 3-15: Verfahrensablauf zur Bildung neuer Referenzganglinien	82
Bild 3-16: Gegenüberstellung einer Referenzganglinie (montags) mit zwei weiteren Ganglinien	88

Bild 3-17:	Gegenüberstellung einer Referenzganglinie (Freitags) mit einer Freitags-Ganglinie (14.01.05) sowie der Testergebnisse zur Referenzbildung Korrelationsrechnung: Aufnahme in Referenz Chi-Quadrat-Anpassungstest: keine Aufnahme in Referenz	91
Bild 3-18:	Gegenüberstellung einer Referenzganglinie (Freitags) mit einer frei definierten Freitags-Ganglinie (Abweichung ca. 9,5% jedes Zählwertes von Referenz) sowie der Testergebnisse zur Referenzbildung Korrelationsrechnung: Aufnahme in Referenz Chi-Quadrat-Anpassungstest: Aufnahme in Referenz	92
Bild 3-19:	Gegenüberstellung einer normierten Referenzganglinie (Freitags) mit einer normierten Freitags-Ganglinie (14.01.05)	92
Bild 3-19:	Knotenpunkt in Darmstadt mit Lage der Detektoren (KP Rheinstraße / Am Kavalleriesand) [QUELLE: Straßenverkehrsamt Stadt Darmstadt]	98
Bild 3-20:	Über mehrere Detektoren eines Querschnitts zusammengefasste Tagesganglinie der Verkehrsbelastungen [Fahrzeuge pro 15 Minuten]	99
Bild 3-21:	Vergleich von Verkehrsmengen und Geschwindigkeiten zweier Streckenabschnitte in Darmstadt in der morgendlichen Spitzenstunde	105
Bild 3-22:	Beispiel einer Gegenüberstellung von Online-Messwerten FTD / Detektoren LSA bei einer Verkehrsstörung in der Zeit von 15 bis 16 Uhr	106
Bild 3-23:	Schematische Darstellung des Fundamentaldiagramms	108
Bild 3-24:	Geschwindigkeits-Verkehrsstärke-Diagramme an drei Knotenpunktzufahrten in Darmstadt, unterteilt in jeweils drei Streckenabschnitte (letzter, rechter Streckenabschnitt befindet sich an LSA)	109
Bild 3-25:	Beispiel ÖV-FTD – Fahrt zwischen Darmstadt und Frankfurt	114
Bild 3-26:	ÖPNV-Datenmodell (angelehnt an [VDV, 2001])	115
Bild 3-27:	Ausschnitt mit Straßenbahnlinie und Buslinie in Darmstadt	117
Bild 3-28:	Zuordnung von Bewegungsspuren zu Haltestellen	118
Bild 3-29:	Idealisierung eines Kreises mit Zwischenpunkten	119
Bild 3-30:	Suchraum eines Punktes P_i für die Ermittlung naher Haltestellen	120
Bild 3-31:	Bewegungsspur eines Fußgängers mit Datenreduktion	123
Bild 3-32:	Häufung von Bewegungsspuren zur Generierung neuer Datenbankabschnitte für Fußgänger und Radfahrer	124
Bild 3-33:	Ergebnis der Berechnung von Schwerpunkten von Einzel-Clustern	127
Bild 4-1:	Reduktion von Bewegungsdaten im Motorisierten Individualverkehr (links: nicht reduzierte Spur mit 1326 Datensätzen; rechts: reduzierte Spur mit 88 Datensätzen)	131
Bild 4-2:	Ausgedünnte Bewegungsspur, Öffentlicher Verkehr (Linie 9, Darmstadt)	132

Bild 4-4:	Detektorreferenz für einen Montag mit Standardabweichung	135
Bild 4-5:	Beispiel eines Ergebnisses des MapMatchings	137
Bild 4-7:	Gegenüberstellung der Referenzganglinien der Geschwindigkeiten eines Streckenabschnitts in Darmstadt mit zwei Einzelfahrten (Normalfahrt, Staufahrt) – ohne Detektorreferenz	140
Bild 4-8:	Gegenüberstellung der Referenzganglinien der Geschwindigkeiten eines Streckenabschnitts in Darmstadt mit zwei Einzelfahrten (Normalfahrt, Staufahrt) – mit Detektorreferenz	141
Bild 4-9:	Fusionierte Detektorganglinie und Detektorreferenz einer LSA-Zufahrt	141
Bild 5-1:	Wertschöpfungskette „Verkehrsdaten → Mobilitätsdienst“ in einer PPP	149
Bild 5-2:	Datenfluss im Betreibermodell „Betrieb durch Telekommunikationsunternehmen“	152
Bild 9-1:	Ausschnitt des kodierten Verkehrsnetzes in der mikroskopischen Simulation	199
Bild 9-2:	Mittlere Geschwindigkeiten in Streckenabschnitten (Rheinstraße, Darmstadt) erzeugt durch einen Simulationslauf	201
Bild 9-3:	Gegenüberstellung von Geschwindigkeitganglinien aus Messungen und Simulationsergebnissen (morgendliche Spitzenstunde / Rheinstraße)	202
Bild 9-4:	Erkennung fehlerhafter Detektorkennwerte (Zählwerte / Belegungsgrad) aus der Betrachtung aller Detektoren am Knotenpunkt A1 (Rheinstraße / Am Kavalleriesand) in Darmstadt zu bestimmten Zeitpunkten am 9.2.2004	204
Bild 9-5:	Beispiele zweier Tagesganglinien, mit denen eine Korrelationsberechnung zur Prüfung der Referenzverbesserung durchgeführt wurde	205
Bild 9-6:	Referenzganglinie Detektoren / Zählwerte 14.01.05; KP A22	206
Bild 9-7:	Referenzganglinie der Geschwindigkeiten und Einzelfahrten, Neckarstraße	207
Bild 9-8:	Referenzganglinie Detektoren / Zählwerte 14.01.05; KP A13	208
Bild 9-9:	Referenzganglinie der Geschwindigkeiten und Einzelfahrten, Heidelberger Straße / Heinrichstraße / Eschollbrücker Straße; Link 52390980	208
Bild 9-10:	Referenzganglinie Detektoren / Zählwerte 14.01.05; KP A14	209
Bild 9-11:	Referenzganglinie der Geschwindigkeiten und Einzelfahrten, Heidelberger Straße / Bessunger Straße; Link 52390983	209
Bild 9-12:	Referenzganglinie Detektoren / Zählwerte 14.01.05; KP A13	211
Bild 9-13:	Referenzganglinie der Geschwindigkeiten und Einzelfahrten, Heidelberger Straße / Heinrichstraße / Eschollbrücker Straße; Link 52390980	211

9.3 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1-1: Eingesetzte wissenschaftliche Methoden	12
Tabelle 2-1: Verkehrliche Kenngrößen an LSA im innerstädtischen Straßennetz	24
Tabelle 2-2: Verkehrliche Kenngrößen im Außerortsbereich [BAST, 2002]	24
Tabelle 2-3: Verkehrliche Kenngrößen fahrzeuggenerierter Daten	26
Tabelle 2-4: Gegenüberstellung ausgewählter Floating-Car-Data-Verfahren	32
Tabelle 2-5: Qualitätskriterien im Öffentlichen Verkehr (angelehnt an [FGSV, 2001])	38
Tabelle 3-1: Minimal- und Maximalwerte der Drehraten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln	52
Tabelle 3-2: Ergebnis der Analyse einer Pkw-Bewegungsspur	55
Tabelle 3-3: Ergebnis der Analyse einer Straßenbahn-Bewegungsspur	55
Tabelle 3-4: Ergebnis der Analyse einer Fahrrad-Bewegungsspur	56
Tabelle 3-5: Ergebnis der Analyse einer Fußgänger-Bewegungsspur	56
Tabelle 3-6: Detektorkennwerte zur Erkennung von Messwertausfällen	74
Tabelle 3-7: Prüfgrößen für Chi-Quadrat-Anpassungstest	90
Tabelle 3-8: Vertrauenswerte mittlerer Geschwindigkeiten generiert durch FTD	103
Tabelle 3-9: Entscheidungsmatrix beim Vergleich von Online-Messwerten FTD / Detektoren LSA	107
Tabelle 3-10: Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs (Kriterium: Geschwindigkeit)	113
Tabelle 3-11: Beispiel eines Fahrplans (Linie 1 am 24.08.04) mit Haltestellenabfolge	116
Tabelle 4-1: Durchgeführte Erhebungen zur Entwicklungen der FTD-Verfahren	129
Tabelle 4-2: Darstellung der Übertragungszeiten zwischen Endgerät und Zentrale	133
Tabelle 4-3: Zusammenfassende Darstellung der FTD-Verfahrensbewertung; Testfahrt 14.01.2005; 11.45 – 12.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät	142
Tabelle 4-4: Gegenüberstellung der Abfahrtszeiten aus manueller Erhebung und automatisierter Berechnung mittels der FTD-Verfahren mit Verspätungsberechnung	146
Tabelle 5-1: Durchdringungsraten D [%] in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke (q_{ges}) bei der Forderung, das mindestens 1 oder 2 Fahrzeuge einen Streckenabschnitt befahren (bei $P=95\%$).	159

Tabelle 5-2:	Durchschnittliche Verkehrsstärken (DTV) angelehnt an BREITENBERGER [2005]	159
Tabelle 5-3:	Fahrzeugbedarf mit mobiler Erfassungseinrichtung zur vollständigen Detektion im strategischen Netzes der Region Frankfurt RheinMain in der Verkehrsspitzenstunde (HVZ); Randbedingungen: mindestens 1 Fahrzeug befährt einen Streckenabschnitt mit einer Wahrscheinlichkeit von $P=95\%$ in einem Zeitintervall $\Delta t= 15$ Minuten.	160
Tabelle 5-4:	Anzahl mobiler Erfassungsgeräte zur Detektion aller Fahrzeuge im ÖPNV in der Region Frankfurt RheinMain (Abschätzung)	161
Tabelle 5-5:	Investitions- und Betriebskosten für eine vollständige Datenerfassung des Straßenverkehrs und des Öffentlichen Verkehrs in der Region Frankfurt RheinMain	162
Tabelle 6-1:	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	166
Tabelle 9-1:	Eichung des Simulationsmodells Aimsun durch Verkehrszählungen	200
Tabelle 9-2:	Verfahrensbewertung der Testfahrten auf Link 52390982, Neckarstraße	207
Tabelle 9-3:	Verfahrensbewertung der Testfahrten auf Link 52390982, Heidelberger Straße	208
Tabelle 9-4:	Verfahrensbewertung der Testfahrten auf Link 52390983, Heidelberger Straße	210
Tabelle 9-5:	Verfahrensbewertung der Testfahrten auf Link 52390982, Heidelberger Straße	211
Tabelle 9-6:	Zusammenfassende Darstellung der FTD-Verfahrensbewertung; Testfahrt 14.01.2005; 11.00 – 11.15 Uhr; normale Befahrung mit 4 Endgeräten	212
Tabelle 9-7:	Zusammenfassende Darstellung der FTD-Verfahrensbewertung; Testfahrt 14.01.2005; 11.45 – 12.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät	213
Tabelle 9-8:	Zusammenfassende Darstellung der FTD-Verfahrensbewertung; Testfahrt 14.01.2005; 12.45 – 13.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät	214
Tabelle 9-9:	Situationsabhängige Positionsbestimmung für Fußgängernavigation	216
Tabelle 9-10:	Gut geeignete Technologien zur Fußgängernavigation	218
Tabelle 9-11:	Bedingt geeignete Technologien zur Fußgängernavigation	218
Tabelle 9-12:	Ungeeignete Technologien zur Fußgängernavigation	218

9.4 Abkürzungen

BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
EOTD	Enhanced Observed Time Difference
EU	Europäische Union
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FCD	Floating-Car-Data
FTD	Floating Traveller Data
GATS	Global Automotive Standard
GIS	Geografisches Informationssystem
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System, satellitengestütztes System zur weltweiten Positionsbestimmung
GSM	Global System for Mobile Communications
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HCM	Highway Capacity Manual
LBS	Location-Based-Services
LSA	Lichtsignalanlage
MDA2	Mobile Digital Assistant, Version 2
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NMV	Nichtmotorisierter Individualverkehr
Kfz	Kraftfahrzeug
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PDA	Personal Digital Assistant
Pkw	Personenkraftwagen
PPP	Public-Private-Partnership
RDS	Radio-Data-System
RBL	Rechnergestütztes Betriebsleitsystem
SMS	Short Message Service
TMC	Traffic-Message-Channel
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WAP	Wireless Application Protocol
WGS 84	World Geodetic System 1984 - Koordinatensystem zur Vermessung der Erde und ihrer Objekte. Es ist Grundlage des Global Positioning Systems (GPS)
W-LAN	Wireless Local Area Network
XFCD	Extended Floating Car Data

9.5 Bezeichnungen

b	Beschleunigung
d_x	Abstand zwischen zwei Punkten in X
d_y	Abstand zwischen zwei Punkten in Y
Index i	Index für Nummerierung eines Übertragungsintervall für Verkehrsdaten
Index j	Index für Messreihe
k	Verkehrsdichte
M	Anzahl der Fahrzeuge in einem Wegabschnitt
n_{Det}	Anzahl der Detektoren in einem Querschnitt
n_i	Anzahl der Messwerte im Zeitintervall i
$p_{i,x}$	X-Koordinate des Punktes i
$p_{i,y}$	Y-Koordinate des Punktes i
$p_{i,L}$	Längengrad des Punktes i
$p_{i,B}$	Breitengrad des Punktes i
$\overline{p}_{i,x}$	X-Koordinate des Cluster-Schwerpunktes im Cluster i
$\overline{p}_{i,y}$	Y-Koordinate des Cluster-Schwerpunktes im Cluster i
q	Verkehrsstärke
R	Kreisradius
$S_{i,z}$	Standardabweichung im Zeitintervall i
$S_{i,Z,neu}$	Neue Standardabweichung im Zeitintervall i
$S_{i,Z,alt}$	Alte Standardabweichung im Zeitintervall i
t	Zeitstempel, Uhrzeit
$t_{i,Ankunft-Soll}$	Soll-Ankunftszeit eines ÖV-Fahrzeugs an Haltestelle i
$t_{i,Ankunft-Ist}$	Ist-Ankunftszeit eines ÖV-Fahrzeugs an Haltestelle i
Δt	Zeitänderung
v	Geschwindigkeit

\bar{v}_l	Mittlere lokale Geschwindigkeit am Beobachtungsquerschnitt
\bar{v}_m	Mittlere momentane Geschwindigkeit im Wegabschnitt
ω	Drehrate
ρ	Bewegungswinkel
ρ	Korrelationskoeffizient
$\delta_{\text{Re,Akt}}$	Kovarianz für Referenzganglinie und aktuelle Ganglinie
X^2	Prüfgröße des Chi-Quadrat-Anpassungstest
x	Weg
Δx	Wegänderung
\bar{Z}_i	Mittlerer Zählwert im Zeitintervall i (z.B. 7:15 -7:30 Uhr)
$Z_i(j)$	Zählwert der Messreihe j im Zeitintervall i
$\bar{Z}_{i,\text{neu}}$	Neuer mittlerer Zählwert im Zeitintervall i
$\bar{Z}_{i,\text{alt}}$	Alter mittlerer Zählwert im Zeitintervall i
$Z_{\text{Sum},i}$	Summe der Zählwert im Zeitintervall i

9.6 Projekte zur Generierung von Floating-Car-Data (FCD)

Stand: März 2005

Projektname	Projektrahmen	Ort	Zielsetzung	Technische Daten (Geräte, Kommunikation, Flottenmerkmale...)	aktueller Stand	Quelle
DIANA	Staufreies Hessen 2015	Hessen	hochwertige dynamische Information zur individuellen Zielführung einschließlich nachgeordnetes Netz	GPS/GSM, 40 Fahrzeuge bei Beginn des Pilotbetriebs, 100 Fahrzeuge „des Landes Hessen“ angekündigt	Beginn des Pilotbetriebs im Januar 2005	http://www.hessen.de/stk/index.cfm?MenuNodeID=D131BEFB-1402-48D2-9E490A7A733C8C6D&gbAction=gbContentFullDisplay&ObjectID=D24F2CD0-2F8E-413E-97A6E73F0EB566B2
ORINOKO	VM 2010 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	Nürnberg	Verkehrslageerfassung, Qualitätssicherung, Verbesserung LSA	Fusion mit stationären Detektoren, GPS/Funk, 500 Taxen	Geplante Laufzeit: 12.2004 - 2.2008, Verkehrslage verfügbar	http://www.nuernbergverkehr.de/ , s.a. www.adac-nordbayern.de , DLR, www.nuernbergmobil.de , www.verkehrsleitsystem.nuernberg.de
	Integriertes Verkehrs- management- System Graz	Graz	Aufbau eines integrierten Verkehrsmanagements	FCD (Taxi), Kombination mit weiteren Daten (LSA- Detektoren, Parkhaus- und Parkautomatendaten, Baustelleninformation, ÖV- Daten, Umweltdaten (Luft, Lärm))	Laufzeit: Juli 2004 – September 2006, lt. Zeitplan sollte AP2 (Taxi-FCD) im April 2005 anlaufen	http://www.trendsetter-europe.org/index.php?ID=535
X-FCD	INVENT (BMW), BMBF	-	Flächendeckende Verkehrslageerfassung	Kombination der FCD mit sonstigen Daten der Bordsensorik, Einbau in die BMW-Fahrzeug-Flotte	Laufzeit: 07.2001- 06.2005, Technik im Einsatz	http://www.dlr.de/vf/forschung/projekte/invent
-	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	Berlin	Stauinformation, Ermittlung von fahrdynamischen Eigenschaften des Einzelfahrzeuges, über Reisezeiten und Informationen über die Verkehrsdichte	GPS-Empfänger in Fahr- zeugen; Datenübertragung über Betriebsfunk- oder Mobilfunkkanal (GSM)	Mitarbeiterarbeit an diversen Projekten (s. Hinweis in Spalte Projektrahmen)	http://www.dlr.de/vf/testseiten/taxi_fcd.html
City-FCD	Wayflow	Region Frankfurt RheinMain	operative Erprobung von Telematikdienstleistungen für den Ballungsraum.	Taxiflotte in Frankfurt wurde teilweise mit FCD ausgestattet	01.10.1998 - 30.09.2002	http://www.mobiball.de/projekte/wayflow.shtml Verkehrsmusteranalyse innerörtlicher Netze

Projektname	Projektrahmen	Ort	Zielsetzung	Technische Daten (Geräte, Kommunikation, Flottenmerkmale...)	aktueller Stand	Quelle
						mittels FCD, aus Straßenverkehrstechnik 2001, Heft 9
-	„Integriertes Verkehrsmanagement Niedersachsen (IVN)“	Niedersachsen	Zur Fußball Weltmeisterschaft 2006 sollen Verkehrsinformationen aus dem Stadtgebiet Hannover über Traffic Message Channel (TMC) in Navigationssystemen von Pkws verfügbar sein.	Grundlage CityFCD (gedas/IPK)	Realisierung bis zur WM 2006	http://www.innovation.niedersachsen.de/130.html?cHash=7dbda49f76&encryptionKey=&tx_ttnews[backPid]=2&tx_ttnews[pS]=1105458007&tx_ttnews[pointer]=1&tx_ttnews[tt_news]=534 http://www.telematik.niedersachsen.de/servlet/PB/menu/1031709/index.html
move	-	Hannover	-	City-FCD in Bussen Es sind 200 Busse des Liniennetzes ausgestattet. Bereits vorhandene Daten werden aus dem stationären Erfassungssystemen mit den dynamischen Fahrdaten der Busse kombiniert.	scheinbar zumindest teilweise in „Integriertes Verkehrsmanagement Niedersachsen (IVN)“ überführt	Mit CityFCD gegen den Verkehrskollaps in Städten, aus Verkehr und Technik 2004, Heft 6 http://www.gedas.com/gedasag/international/company/en/press/2003/press_release_17_03_2003.html
Mittlerer Ring	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	München	-	Taxi-FCD mit 220 Fahrzeugen, XFCD Fahrzeuge	12.04 – 3.08	Dispositionssysteme als FCD-Quellen für eine verbesserte Verkehrslagerekonstruktion in Städten, aus Straßenverkehrstechnik 2004, Heft 9 Analyse der Verkehrsqualität mit innovativer Datenerfassung – Beispiel Mittlerer Ring München, aus Straßenverkehrstechnik 99, Heft 5 Extendes Floating Car Data – Potenziale für die Verkehrsinformation und notwendige Durchdringungsrate, aus

Projektname	Projektrahmen	Ort	Zielsetzung	Technische Daten (Geräte, Kommunikation, Flottenmerkmale...)	aktueller Stand	Quelle
						Straßenverkehrstechnik 2004, Heft 10
-	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	Stuttgart	-	700 Taxen mit FCD ausgestattet	12.04 – 3.08	http://www.kompetenznetze.de/Redaktion/Zentralredaktion/Aktuell/Medien/Jahrestagung05/sc_haefer,property=pdf.pdf
-	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	Hamburg	-	1600 Taxen	12.04 – 3.08	http://www.kompetenznetze.de/Redaktion/Zentralredaktion/Aktuell/Medien/Jahrestagung05/sc_haefer,property=pdf.pdf
Eye in the sky	-	Athen	Olympia 2004	Busse sind mit CityFCD ausgestattet, gleiche Technik wie in Frankfurt	2004	http://www.gedas.com/gedasag/international/company/en/about_gedas/customer_newsletter/2002/Issue_3_02/fcd.html
-	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	Wien	-	600 Taxen sind mit FCD ausgestattet	2003	http://www.wien.gv.at/verkehr/vema/verkehrslande/projekt.htm?S0=fcd#P0
Netherlands Prelude Project	-	Rotterdam	Ziel ist es die Fahrzeugführer bei Stau auf der Autobahn schnell und präzise umlenken können.	Untersuchung mit 60 Fahrzeugen, die mit speziellen mobilen Satellitenübertragungs- einrichtungen ausgestattet sind.	2000	http://idw-online.de/pages/de/news10158
Optis	-	Göteborg	Verbesserung des Verkehrsflusses	223 Taxen und private Fahrzeugführer mit vielen gefahrenen Kilometern pro	Feldversuch in 2002, Evaluierung abgeschlossen,	http://www.centrico.ten-t.com/documents/er_conference/presentations/2_5_6_OPTIS_Jenstav.ppt

Projektname	Projektrahmen	Ort	Zielsetzung	Technische Daten (Geräte, Kommunikation, Flottenmerkmale...)	aktueller Stand	Quelle
				Tag	Implementierung war in weiteren Städten in Schweden geplant	
P-DRGS	-	Japan	The purpose of the consortium is to realize the Dynamic Route Guidance System (DRGS) based on the utilization of the world's largest Probe-Car performance experiment platform in Nagoya area, through developing algorithm, analyzing probe-car data, delivering dynamic route guidance information, revising map information, providing intelligent mobility information, and making the business development planning.	2002: Busse, die mit FCD ausgestattet sind. 2004: 10 000 Fahrzeuge mit FCD	Oktober 2003 to March 2008, Technologieentwicklung in 2004, Implementierung in 2005	http://www.p-drgs.com/english/mokuteki01.html
JSK	-	Yokohama	-	30 Taxen und Busse	1999 - 2002	http://www.itsa.org/resources.nsf/Files/ATCE25_%20FCD_Pilots_revised/\$file/ATCE25_%20FCD_Pilots_revised.doc
Mediamobile	-	Frankreich	Es soll in Paris und in den 20 größten Städten Informationen über den Verkehrszustand über FCD und Mobiltelefone ermöglicht werden.	1700 Taxen in Paris sind mit FCD ausgestattet	2003	http://www.sbd.co.uk/assets/280__RDS_TMC_Sample.pdf
Road Traffic Advisor		England	-	-	-	http://ivsource.net/archivep/2004/apr/040426_Bishop_FloatingCarProjects.ppt
-	-	Nagoya	-	1570 Taxen ist mit FCD ausgestattet, die Daten des gesamten Stadtgebiets	01. – 03.2002	Transportation Systems, Planung and Operation; Volume 2, Performance of Expressway Travel Time Estimation on the

Projektname	Projektrahmen	Ort	Zielsetzung	Technische Daten (Geräte, Kommunikation, Flottenmerkmale...)	aktueller Stand	Quelle
				aufzeichneten.		Basis of Probe and Detector Data
Dirigent	-	Stockholm	-	Im Norden der Stadt liefern 20-30 Fahrzeuge Daten über FCD	-	http://www.infra.kth.se/ctr/publikationer/ctr2002_05.pdf

9.7 FTD – Motorsierter Individualverkehr

9.7.1 Mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs

Die Entwicklung und Überprüfung eines Modells zur Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs im Straßennetz auf Basis stationär und mobil erhobener Daten erfordert den Zugriff auf eine umfassende Datensammlung. Zu Beginn der Forschungsarbeiten lagen nur im begrenzten Umfang Detektordaten und Bewegungsdaten mobiler Endgeräte für eine Analyse und zum Verfahrensaufbau vor. Daher wurde ein mikroskopisches Verkehrsmodell eingesetzt, mit dessen Hilfe das Verhalten jedes einzelnen im Straßennetz fahrenden Fahrzeugs abgebildet und simuliert werden konnte. Dazu wurde das mikroskopische Verkehrsmodell AIMSUN der TSS-Transport Simulation Systems aus Barcelona verwendet. Standardmäßig liefert das Programm Kennwerte von Detektoren, die im modellierten Verkehrsnetz abgebildet wurden. Nicht ausgegeben wurden Bewegungsinformationen einzelner Fahrzeuge, die sich durch das Verkehrsnetz bewegen. Daher war die Entwicklung eines Softwaremoduls erforderlich, das die Fahrzeuginformationen (befahrene Streckenabschnitte, mittlere Geschwindigkeiten) automatisiert in eine Datenbank exportiert. Aus den so gewonnen Kennwerten der Fahrzeuge (Mobilsysteme) und Detektorwerten (stationäre Daten) konnten umfangreiche Zeitreihenanalysen der Geschwindigkeitsverteilungen und des Verkehrsaufkommens für einzelne Streckensegmente durchgeführt werden. Zum Aufbau des Verkehrsmodells waren folgende Arbeitsschritte erforderlich:

Kodierung des Verkehrsnetzes

Für die Abbildung des realen Verkehrsnetzes in das mikroskopische Verkehrsmodell AIMSUN sind die Streckenelemente mit der Anzahl der Fahrstreifen, Knotenpunkte mit ihren Abbiegebeziehungen, Detektoren und Signalzeitenpläne zu modellieren. Hierzu wurde das Programm TEDI der TSS-Transport Simulation Systems verwandt. Alle Eingaben mussten maßstabsgerecht durchgeführt werden, damit bei der eigentlichen Simulation korrekte Ergebnisse für die weiteren Auswertungen vorlagen. Einen Ausschnitt des abgebildeten Streckennetzes (Knotenpunkt Rheinstraße / Berliner Allee und Rheinstraße / Am Kavalleriesand) zeigt **Bild 9-1**:

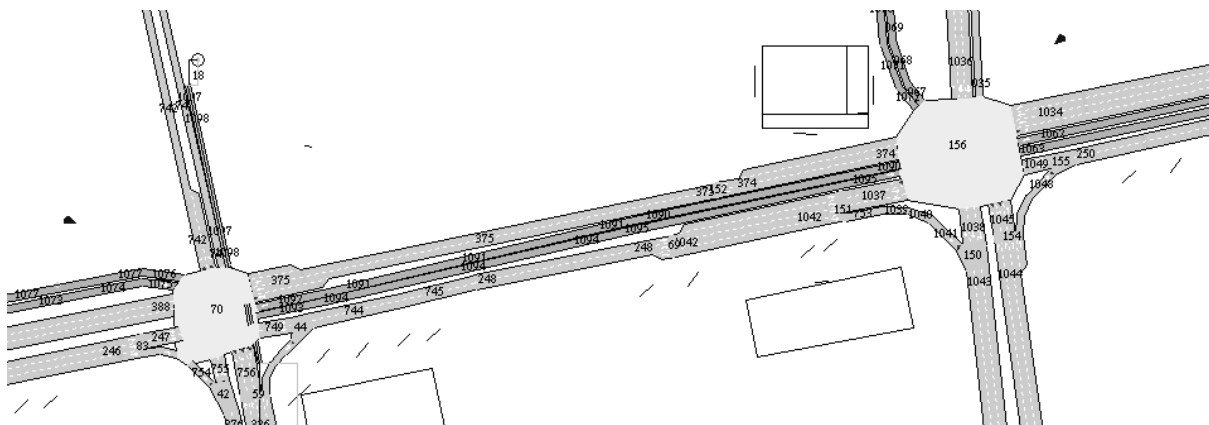


Bild 9-1: Ausschnitt des kodierten Verkehrsnetzes in der mikroskopischen Simulation

Neben dem Straßennetz wurden auch die Trassen des Öffentlichen Verkehrs (dunkelgrau) abgebildet, da das Untersuchungsstrecke (Rheinstraße in Darmstadt) sehr stark mit Bussen und Straßenbahnen befahren werden, die sich an den Lichtsignalanlagen bevorrechtigt werden. Dies reduziert die Leistungsfähigkeit der LSA in Bezug auf den Motorisierten Individualverkehr.

Abbildung der Verkehrsnachfrage

Nach der Kodierung des Verkehrsnetzes war festzulegen, wie viel Verkehr über das Streckennetz fahren wird. Hierzu wurde eine Quelle-Ziel-Matrix aufgebaut, die in das Programm einzugeben war. Da für den untersuchten Streckenabschnitt keine aktuellen Angaben zum Verkehrsaufkommen vorlagen, wurden Verkehrserhebungen in der morgendlichen Spitzenstunde durchgeführt. Bei den Zählungen wurde das Verkehrsaufkommen an unterschiedlichen Messquerschnitten erfasst. Im Verkehrsmodell wurden an Stellen, an denen Verkehrserhebungen durchgeführt wurden, Detektoren integriert. Durch diese Detektoren konnte überprüft werden, ob das gezählte Verkehrsaufkommen mit dem in der Simulation hinterlegten und detektierten Verkehrsaufkommen an den Messquerschnitten übereinstimmte. Durch ein iteratives Verfahren, in dem die Verkehrsnachfrage im Simulationsmodell angepasst wurde, konnte eine sehr gute Abbildung des tatsächlichen Verkehrsaufkommens erzielt werden. Das Ergebnis des so kalibrierten Verkehrsmodell mit einer Gegenüberstellung der Zählwerte aus der Verkehrserhebung und der Simulation zeigt **Tabelle 9-1**.

	Zählwert aus Verkehrszählung	Zählwert aus Simulation	Abweichung
	[Kfz/h]	[Kfz/h]	[%]
Querschnitt 1:	2929	2914	0,51%
Querschnitt 2:	2146	2106	1,86%
Querschnitt 3:	477	492	3,14%
Querschnitt 4:	1300	1297	0,23%
Querschnitt 5:	1106	1105	0,09%
Querschnitt 6:	210	221	5,24%

Tabelle 9-1: Eichung des Simulationsmodells Aimsun durch Verkehrszählungen

Durchführung von Simulationsläufen und Auswertung von mobil und stationär gewonnenen Daten

Die modellierte Verkehrsnachfrage repräsentierte das Verkehrsaufkommen in der morgendlichen Spitzenstunde zwischen 7.00 und 8:00 Uhr. Die Simulation wurde ebenfalls für dieses Zeitintervall durchgeführt. Um Floating-Car-Daten (mobil gewonnene Daten) zu erfassen, wurde ein eigens entwickeltes Softwaremodul eingesetzt, welches eine zu definierende Anzahl von Fahrzeugen im Netz hinsichtlich der gefahrenen Geschwindigkeiten erfasst, und die Messwerte mit den befahren Strecken-Id's in eine Datenbank exportiert. Anschließend konnte eine Analyse der so gewonnenen Werte durchgeführt werden. Für einzelne Streckenabschnitte wurden Geschwindigkeitganglinien erzeugt. Während in einem ersten Schritt lediglich die mittleren Geschwindigkeitswerte von unterschiedlichen Fahrzeugen dargestellt wurde ist die Idee entstanden, durch eine Darstellung der Streuungswerte eine Aussage zu den Geschwindigkeitsschwankungen ebenfalls mit abzubilden. Ein Beispiel dieser Vorgehensweise zeigt **Bild 9-2**.

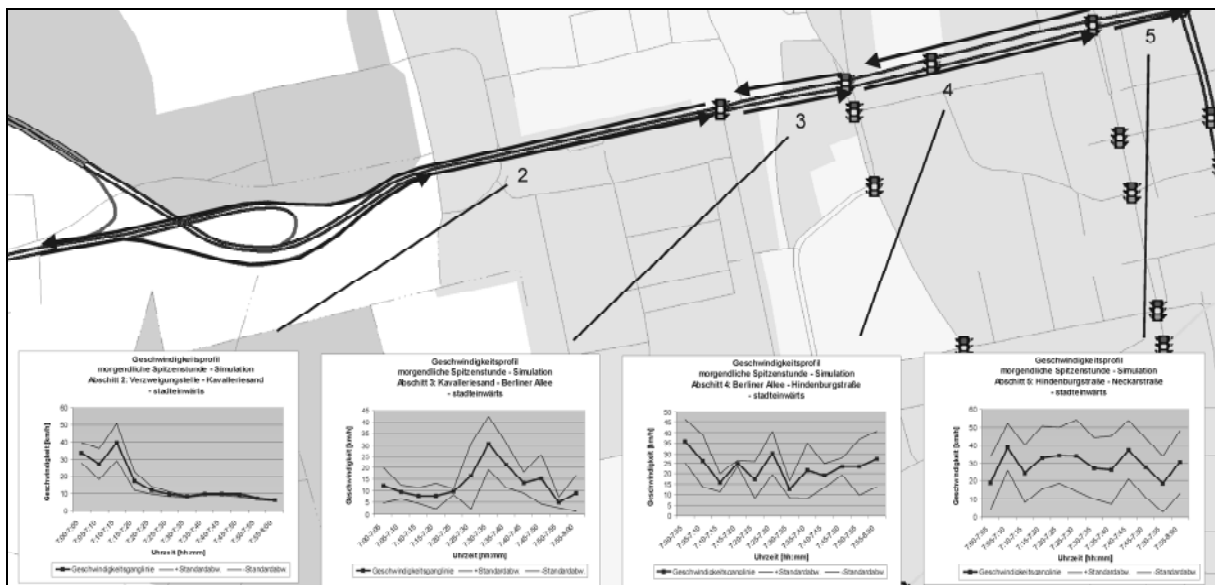


Bild 9-2: Mittlere Geschwindigkeiten in Streckenabschnitten (Rheinstraße, Darmstadt) erzeugt durch einen Simulationslauf

Der in **Bild 9-2** dargestellte Abschnitt 2 ist an die im Westen angrenzenden Autobahnen angebunden. In der morgendlichen Spitzenstunde ist der Pendleranteil von den Autobahnen in die Darmstädter Innenstadt sehr groß. Durch die LSA hinter dem Abschnitt 2 kommt es zu sehr großen Rückstaus. Deutlich wird dies im Simulationsergebnis durch die geringe momentane Geschwindigkeit im Abschnitt 2, die bis auf 10 Km/h absinkt. Die Standardabweichung ist ebenfalls sehr gering. Das bedeutet, dass kein Fahrzeug die Geschwindigkeit frei wählen kann. Es entstehen großer Rückstau. In den übrigen Streckenabschnitten sind höhere Geschwindigkeiten fahrbar, da durch die LSA am Ende des Abschnitts 2 eine Art Zufahrtsdosierung in das übrige Verkehrsnetz erfolgt und dadurch die Leistungsfähigkeit an den übrigen LSA zufrieden stellend ist. Eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit Resultaten aus Testfahrten ist in **Bild 9-3** dargestellt.

Folgende Rückschlüsse wurden aus den Erkenntnissen gezogen:

- Ein Stau ist immer dann anzutreffen, wenn innerhalb eines Umlaufs nicht alle Fahrzeuge in der vorgegebenen Grünzeit abfließen können.
- Die mittlere momentane Geschwindigkeit reduziert sich in staufreien Abschnitten durch die Standzeiten an LSA.
- Die Standardabweichung der Geschwindigkeiten ist in staufreien Abschnitten größer als bei Abschnitten mit Stausituationen (vgl. Abschnitt 2 und Abschnitt 5), da einige Fahrzeuge die Streckenabschnitte mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit befahren können. Andere Fahrzeuge müssen an LSA anhalten.
- In Bereichen, in denen Stausituationen auftreten, verringert sich die Standardabweichung der Geschwindigkeiten.

Auf der Grundlage der Simulationsergebnisse wurden die gewonnen Erkenntnisse genutzt und das in **Kapitel 3.6** beschriebene FTD-Verfahren für den Motorisierten Individualverkehr

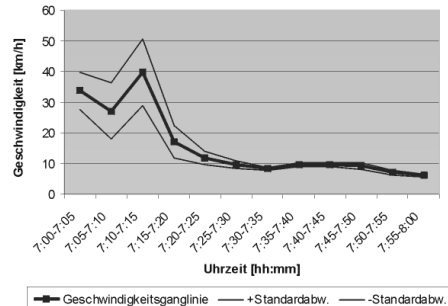
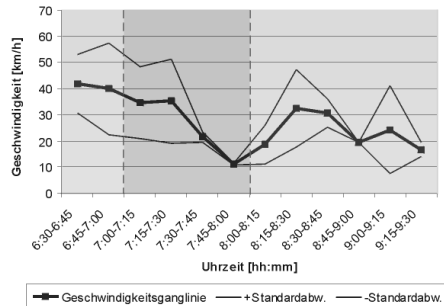
zu entwickeln. Eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit Resultaten aus Testfahrten ist in **Bild 9-3** dargestellt.

Messung

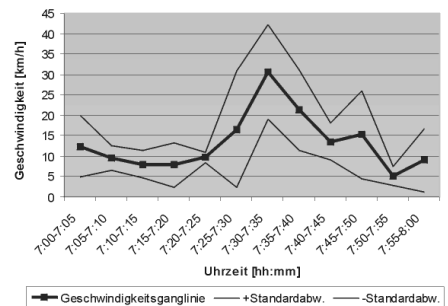
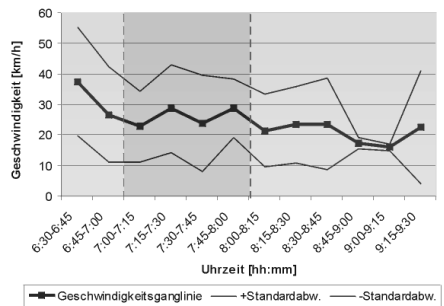
Simulation

Geschwindigkeitsprofil

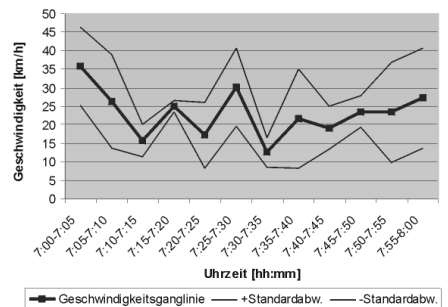
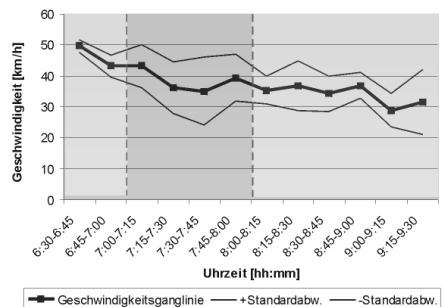
Abschnitt 2: Verzweigungstelle - Kavalleriesand - stadteinwärts



Abschnitt 3: Kavalleriesand - Berliner Allee - stadteinwärts



Abschnitt 4: Berliner Allee - Hindenburgstraße - stadteinwärts



Abschnitt 5: Hindenburgstraße - Neckarstraße - stadteinwärts

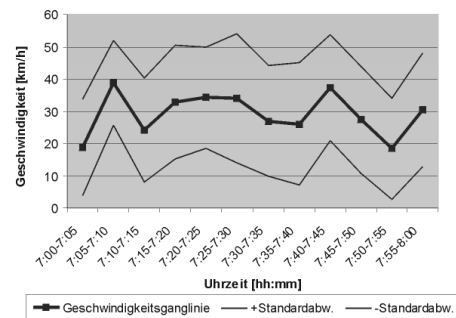
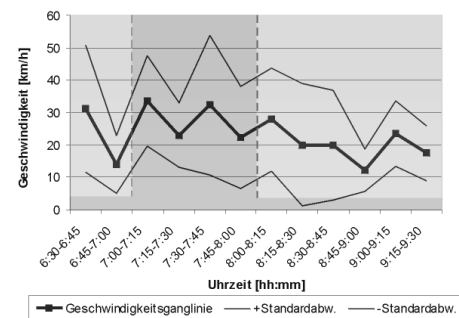


Bild 9-3: Gegenüberstellung von Geschwindigkeitganglinien aus Messungen und Simulationsergebnissen (morgendliche Spitzenstunde / Rheinstraße)

9.7.2 Erkennung von fehlerhaften Detektorwerten

In Darmstadt liefern die Detektoren Daten in unterschiedlicher Qualität. Fehlerhafte Detektorwerte müssen im Online-Betrieb erfasst und durch Ersatzwerte ausgetauscht werden. Auf diese Thematik wurde in **Kapitel 3.6.2** eingegangen. Es wurden regelmäßig Messwerteausfälle ($Z=0$ [Kfz/15 Min], $B=0$ [%]) festgestellt. Dies ist zunächst als plausibles Resultat zu bewerten, da vor allem nachts sehr wenig Verkehr auf den Straßen zu verzeichnen ist. Treten diese Werte aber tagsüber, z.B. in den Spitzenstunden, auf müssen die Daten zunächst in Frage gestellt werden. Um herauszufinden, ob die Messwerte fehlerhaft sind, wurden benachbarte Detektoren am Knotenpunkt ebenfalls mit in die Analyse einbezogen. Das Ergebnis war, dass die fehlerhaften Daten an allen Detektoren einer LSA gleichzeitig erzeugt wurden. Ein Beispiel für diese Auffälligkeiten ist in **Bild 9-4** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Zeitintervall zwischen 8:00-9:00 Uhr, 11:15 Uhr, 15:15 Uhr und 18:45 Uhr zeitgleich an allen Detektoren ungültige Messwerte mit Zählwerten=0 und Belegungsgraden=100% detektiert wurden. Diese fehlerhaften Wertekombinationen können erkannt und durch Ersatzwerte ausgetauscht werden.

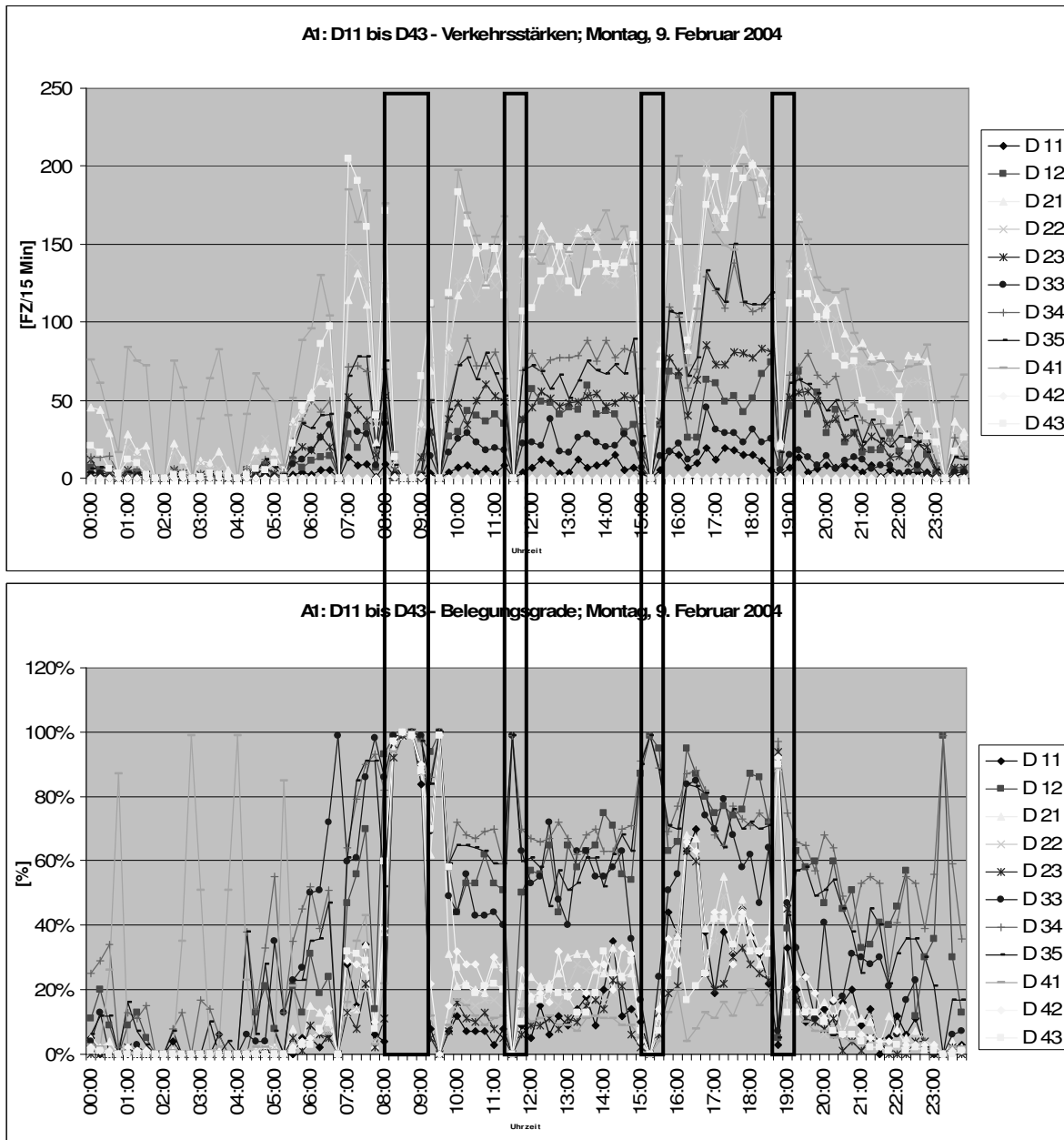


Bild 9-4: Erkennung fehlerhafter Detektorkennwerte (Zählwerte / Belegungsgrad) aus der Betrachtung aller Detektoren am Knotenpunkt A1 (Rheinstraße / Am Kavalleriesand) in Darmstadt zu bestimmten Zeitpunkten am 9.2.2004

9.7.3 Korrelationstest von Tagesganglinien mit Detektorreferenz

Die eingehenden Detektorwerte werden am Ende eines Tages automatisiert einer Überprüfung auf Gültigkeit unterzogen. Dabei wird eine Korrelationsberechnung durchgeführt bei der überprüft wird, ob eine bestehende Referenzganglinie um eine aktuelle Ganglinie verbessert werden kann. Hierzu muss ein Korrelationskoeffizient berechnet werden. Nimmt dieser Werte größer 0.85 an, wird die Referenzganglinie um die aktuelle Ganglinie verbessert. Zwei Beispiele einer in die Referenz aufzunehmenden Ganglinie ($R=0.99$) und einer abzulehnenden Ganglinie ($R=0.81$) zeigt **Bild 9-5**.

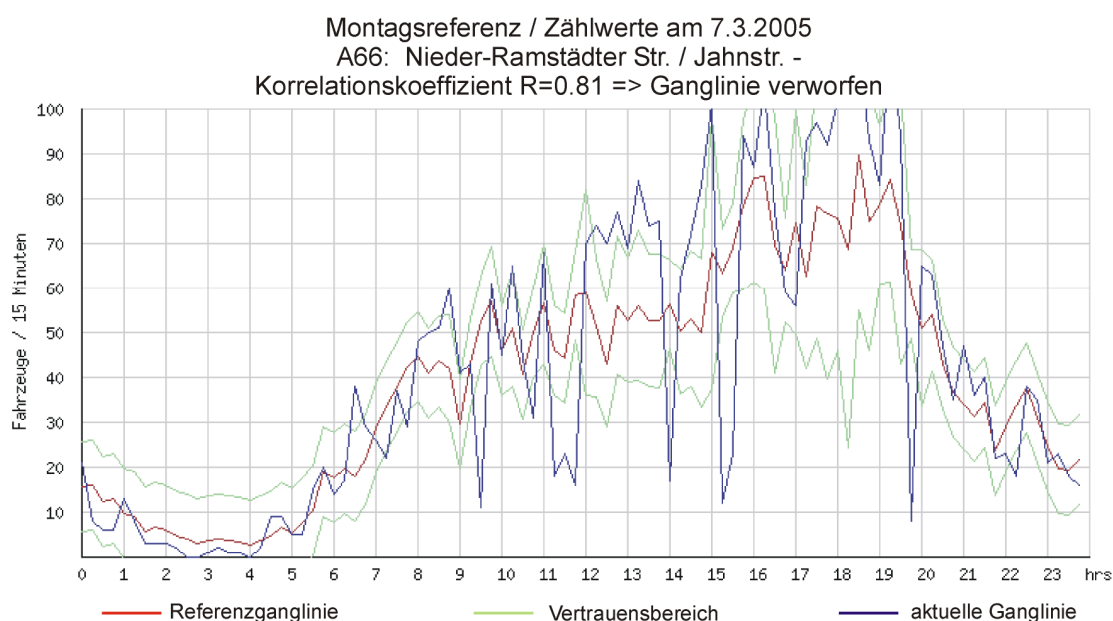
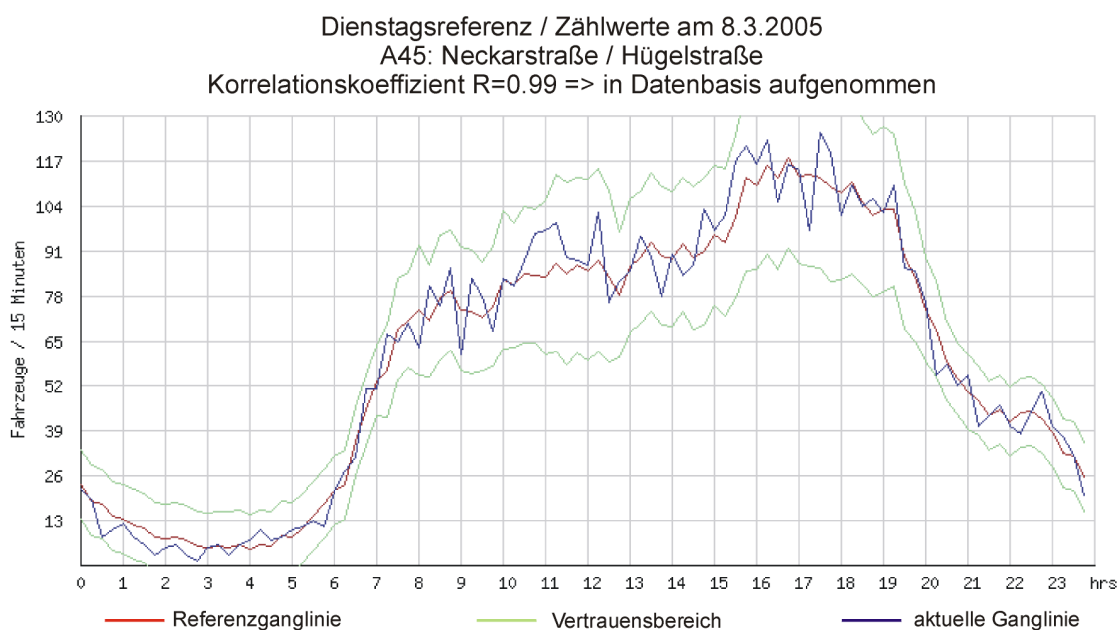


Bild 9-5: Beispiele zweier Tagesganglinien, mit denen eine Korrelationsberechnung zur Prüfung der Referenzverbesserung durchgeführt wurde

9.7.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Sensorfusion

Am 14. Januar 2005 wurden Testfahrten mit insgesamt vier mobilen Endgeräten im Straßennetz durchgeführt. Das Verfahren der „Floating Traveller Data (FTD)“ wurde für jeden befahrenen Link analysiert und bewertet. Dabei wurden ausgewählte Streckenabschnitte detailliert betrachtet, bei denen besondere Auffälligkeiten nachfolgend näher betrachtet werden. Abschließend findet eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung des FTD-Verfahrens an Hand aller befahrenen Streckenabschnitte statt.

Neben dem Aufbau der Ganglinien der Geschwindigkeitsreferenz wurden am 14. Januar Einzelfahrten durchgeführt, bei denen die FTD-Verfahren im Online-Betrieb erprobt wurden. Folgende Einzelfahrten wurden durchgeführt:

- **1. Fahrt, 14.01.2005; 11.00 – 11.15 Uhr; normale Befahrung mit 4 Endgeräten**

Durch die gleichzeitige Verwendung von 4 Endgeräten wird dem zentralenseitigen FTD-Verfahren der Eindruck vermittelt, dass gleichzeitig mehrere Fahrzeuge einen Streckenabschnitt befahren.

- **2. Fahrt, 14.01.2005; 11.45 – 12.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät**

- **3. Fahrt, 14.01.2005; 12.45 – 13.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät**

An verschiedenen Stellen im Straßennetz wurde für ca. 90 Sekunden angehalten. Durch dieses Verhalten sollte eine Stausituation simuliert werden. Da allerdings nur jeweils ein Endgerät im Einsatz war, ist die Plausibilität der Einzelereignisse in Frage zu stellen. Daher muss das zentralenseitige FTD-Verfahren zur Plausibilitätsprüfung einen Vergleich mit den Detektorwerten durchführen.

Knotenpunktzufahrt A22: Neckarstraße / Elisabethenstraße – stadtauswärts; Detektoren D11, D12 ; Link 52390982

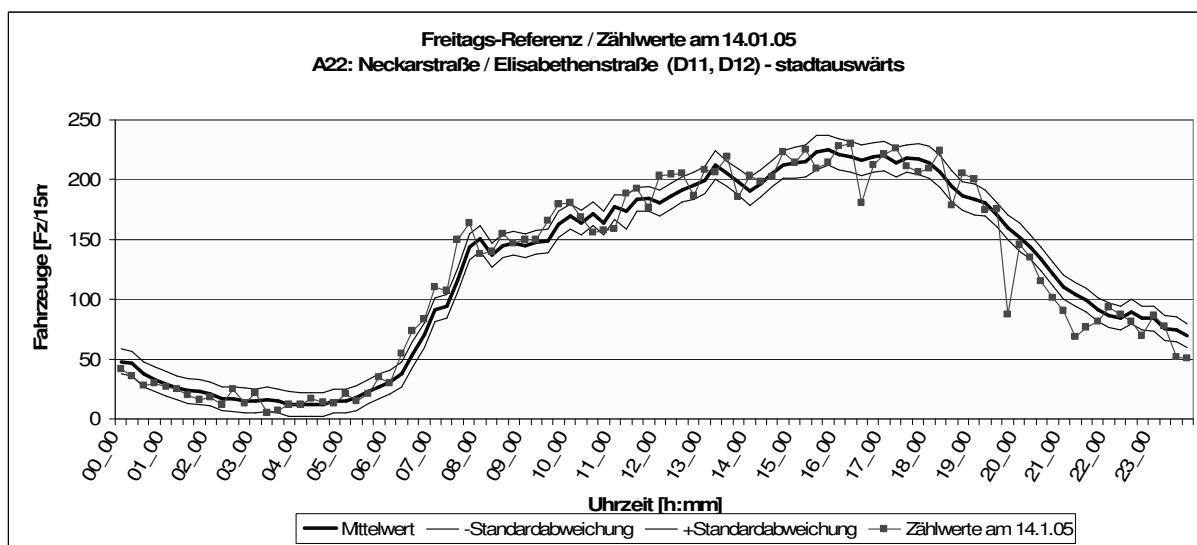


Bild 9-6: Referenzganglinie Detektoren / Zählwerte 14.01.05; KP A22

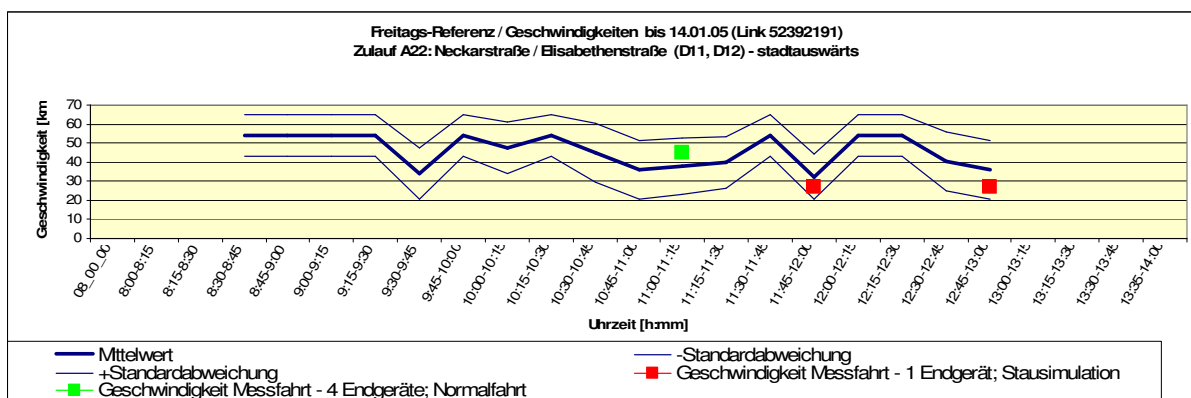


Bild 9-7: Referenzganglinie der Geschwindigkeiten und Einzelfahrten,
Neckarstraße; Link 52390982

Link 52390982 / LSA A22, D11, D12	1. Fahrt 11.00 – 11.15	2. Fahrt 11.45 – 12.00	3. Fahrt 12.45 – 13.00
Fahrtinhalt (Verhalten der Fahrer)	Normal	Normal	Normal
Anzahl Endgeräte	4	1	1
FTD-Bewertungskennwert	1	3	3
Messwert FTD innerhalb Referenz	Ja	Ja	Ja
Sensorfusion erforderlich	Nein	Nein	Nein
Messwert Detektoren innerhalb Referenz	Keine Betrachtung erforderlich	Keine Betrachtung erforderlich	Keine Betrachtung erforderlich
Automatische Bewertung der Geschwindigkeit durch FTD-Sensorfusion: Aktuelle Geschwindigkeit plausibel?	Ja	Ja	Ja
Gegenüberstellung des Ergebnisses mit eigener Beobachtung	Korrekt	Korrekt	Korrekt

Tabelle 9-2: Verfahrensbewertung der Testfahrten auf Link 52390982, Neckarstraße

Die ermittelten Geschwindigkeiten der aller Fahrten werden vom FTD-Verfahren richtig erkannt. Die Messwerte liegen alle innerhalb des Vertrauensbereichs der Geschwindigkeitsreferenz. Daher ist keine weitere Plausibilitätsprüfung mit Detektorwerten durchzuführen. Vor allem die Fahrten mit nur einem Endgerät (2. und 3. Fahrt) können durch den Vergleich mit dem Vertrauensbereich der Referenz als plausibel angesehen werden, obwohl nur ein Einzelmesswert vorliegt.

Knotenpunktzufahrt A13: Heidelberger Straße / Eschollbrücker Straße – stadtauswärts; Detektoren D11-D13; Link 52390980

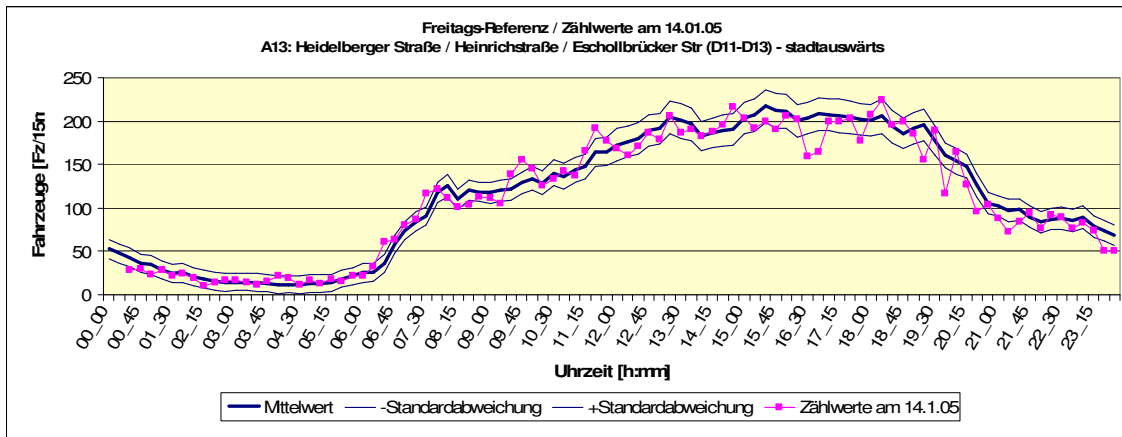


Bild 9-8: Referenzganglinie Detektoren / Zählwerte 14.01.05; KP A13

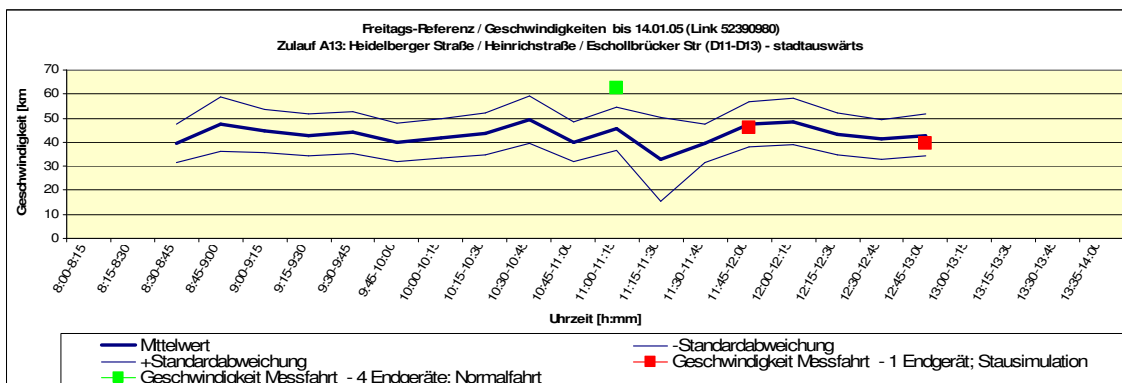


Bild 9-9: Referenzganglinie der Geschwindigkeiten und Einzelfahrten, Heidelberger Straße / Heinrichstraße / Eschollbrücker Straße; Link 52390980

Link 52390980 / LSA A13, D11-D13	1. Fahrt 11.00 – 11.15	2. Fahrt 11.45 – 12.00	4. Fahrt 12.45 – 13.00
Fahrtinhalt (Verhalten der Fahrer)	Normal	Normal	Normal
Anzahl Endgeräte	4	1	1
FTD-Bewertungskennwert	1	3	3
Messwert FTD innerhalb Referenz	Nein	Ja	Ja
Sensorfusion erforderlich	Nein	Nein	Nein
Messwert Detektoren innerhalb Referenz	Keine Betrachtung erforderlich	Keine Betrachtung erforderlich	Keine Betrachtung erforderlich
Automatische Bewertung der Geschwindigkeit durch FTD-Sensorfusion: Aktuelle Geschwindigkeit plausibel?	Ja	Ja	Ja
Gegenüberstellung des Ergebnisses mit eigener Beobachtung	Korrekt	Korrekt	Korrekt

Tabelle 9-3: Verfahrensbewertung der Testfahrten auf Link 52390982, Heidelberger Straße

Das Verfahren liefert für alle Testfahrten richtige Ergebnisse. Auffällig ist allerdings die Fahrt zwischen 11.00 und 11.15 Uhr, bei der die Geschwindigkeit von 62 Km/h außerhalb des Vertrauensbereich der Geschwindigkeitsreferenz liegt. Da dieses Resultat von 4 Endgeräten gleichzeitig gemessen wird, ist das Ergebnis als plausibel zu bewerten, ohne dass ein Vergleich mit der Detektorreferenz durchzuführen ist. Da die zulässige Geschwindigkeit von 50 Km/h während dieser Fahrt überschritten wurde, sollte der Messwert dennoch verworfen werden. Alternativ dazu könnte im Datenmodell die zulässige Geschwindigkeit als aktuelle Geschwindigkeit hinterlegt werden.

Knotenpunktzufahrt A14: Heidelberger Straße / Bessunger Straße – stadtauswärts; Detektoren D11, D12; Link 52390980

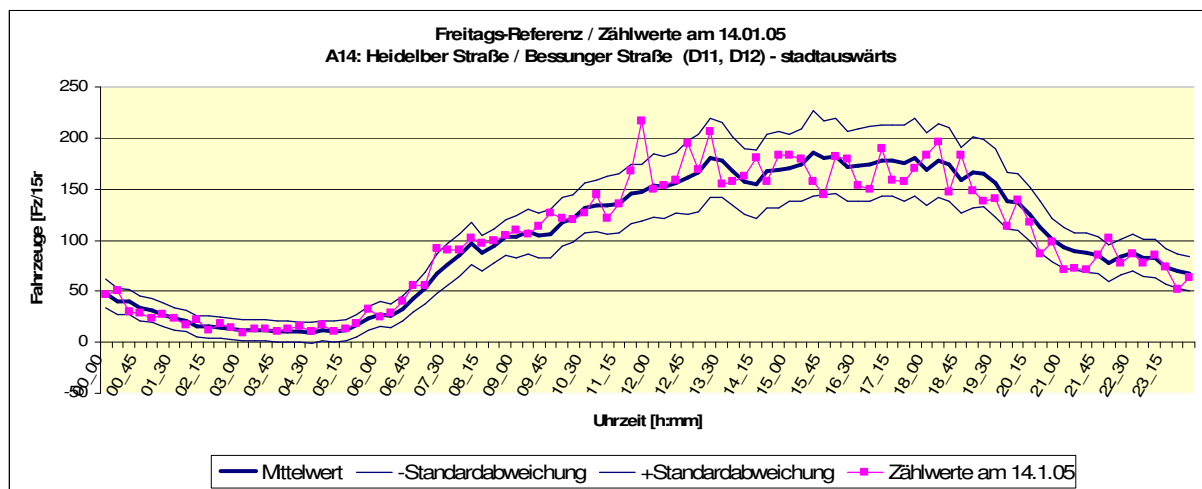


Bild 9-10: Referenzganglinie Detektoren / Zählwerte 14.01.05; KP A14

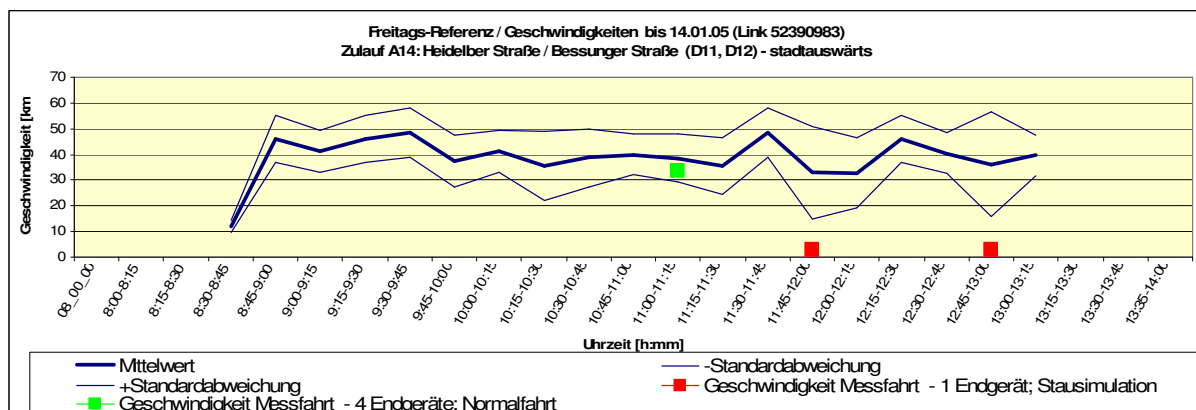


Bild 9-11: Referenzganglinie der Geschwindigkeiten und Einzelfahrten, Heidelberger Straße / Bessunger Straße; Link 52390983

Link 52390983 / LSA A14, D11, D12	1. Fahrt 11.00 – 11.15	2. Fahrt 11.45 – 12.00	4. Fahrt 12.45 – 13.00
Fahrtinhalt (Verhalten der Fahrer)	Normal	Stau	Stau
Anzahl Endgeräte	4	1	1
FTD-Bewertungskennwert	1	3	3
Messwert FTD innerhalb Referenz	Ja	Nein	Nein
Sensorfusion erforderlich	Nein	Ja	Ja
Messwert Detektoren innerhalb Referenz	Keine Betrachtung erforderlich	Ja	Ja
Automatische Bewertung der Geschwindigkeit durch FTD-Sensorfusion: Aktuelle Geschwindigkeit plausibel?	Ja	Nein	Nein
Gegenüberstellung des Ergebnisses mit eigener Beobachtung	Korrekt	Korrekt	Korrekt

Tabelle 9-4: Verfahrensbewertung der Testfahrten auf Link 52390983, Heidelberger Straße

Die Messwerte der 1. Fahrt im Zeitintervall zwischen 11.00 und 11.15 Uhr befinden sich innerhalb des Vertrauensbereichs der Geschwindigkeitsreferenz. Die berechnete Geschwindigkeit ist somit plausibel.

Bei den anderen Fahrten wurde eine Stausituation durch längeres Anhalten im Streckenabschnitt simuliert. Die Geschwindigkeit reduzierte sich daher auf ca. 2 Km/h. Da die Messwerte außerhalb des Vertrauensbereichs der Geschwindigkeitsreferenz liegen, ist eine Plausibilitätsprüfung durch einen Vergleich mit Detektorwerten im Streckenabschnitt vorzunehmen. Da die Zählwerte der Detektoren innerhalb des Vertrauensbereichs der Referenz liegen, wird keine Störung oder signifikante Veränderung vom Normalverlauf festgestellt. Die Einzelmesswerte der Geschwindigkeiten sind somit nicht plausibel. Der Grund für die geringe gefahrene Geschwindigkeit kann nicht automatisiert ermittelt werden. Die Messwerte sind somit zu verwerfen.

Das FTD-Verfahren hat alle betrachteten Situationen korrekt behandelt.

Knotenpunktzufahrt A13: Heidelberger Straße / Eschollbrücker Straße – stadtauswärts; Detektoren D11-D13; Link 52390980

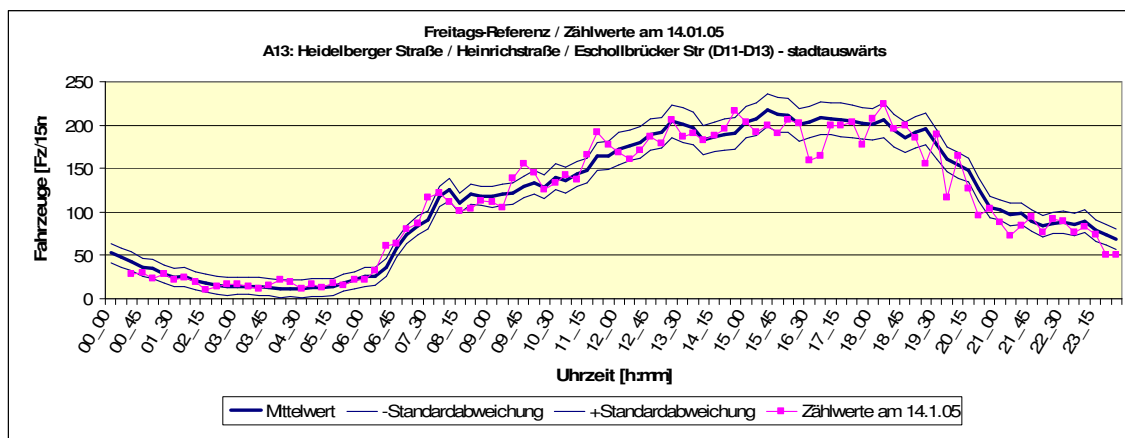


Bild 9-12: Referenzganglinie Detektoren / Zählwerte 14.01.05; KP A13

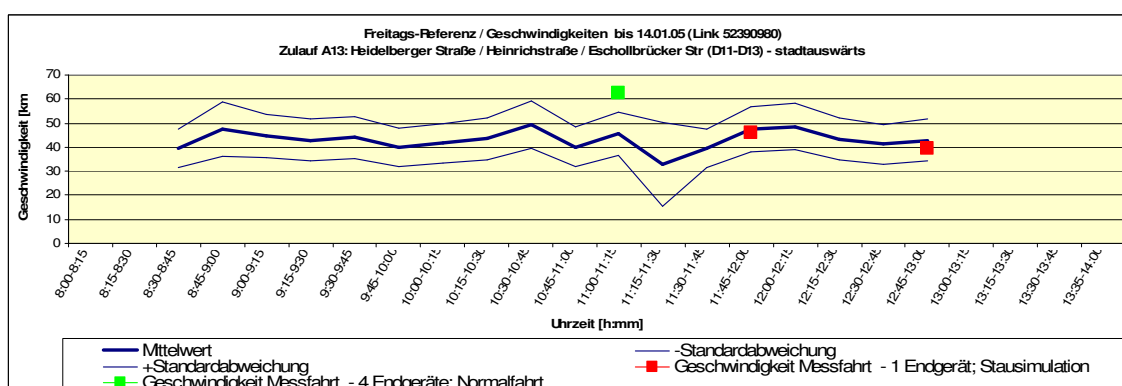


Bild 9-13: Referenzganglinie der Geschwindigkeiten und Einzelfahrten, Heidelberger Straße / Heinrichstraße / Eschollbrücker Straße; Link 52390980

Link 52390980 / LSA A13, D11-D13	1. Fahrt 11.00 – 11.15	2. Fahrt 11.45 – 12.00	4. Fahrt 12.45 – 13.00
Fahrtinhalt (Verhalten der Fahrer)	Normal	Normal	Normal
Anzahl Endgeräte	4	1	1
FTD-Bewertungskennwert	1	3	3
Messwert FTD innerhalb Referenz	Nein	Ja	Ja
Sensorfusion erforderlich	Nein	Nein	Nein
Messwert Detektoren innerhalb Referenz	Keine Betrachtung erforderlich	Keine Betrachtung erforderlich	Keine Betrachtung erforderlich
Automatische Bewertung der Geschwindigkeit durch FTD-Sensorfusion: Aktuelle Geschwindigkeit plausibel?	Ja	Ja	Ja
Gegenüberstellung des Ergebnisses mit eigener Beobachtung	Korrekt	Korrekt	Korrekt

Tabelle 9-5: Verfahrensbewertung der Testfahrten auf Link 52390982, Heidelberger Straße

Das Verfahren liefert für alle Testfahrten richtige Ergebnisse. Auffällig ist allerdings die Fahrt zwischen 11.00 und 11.15 Uhr, bei der die Geschwindigkeit von 62 Km/h außerhalb des Vertrauensbereich der Geschwindigkeitsreferenz liegt. Da dieses Resultat von 4 Endgeräten gleichzeitig gemessen wird, ist das Ergebnis als plausibel zu bewerten, ohne dass ein Vergleich mit der Detektorreferenz durchzuführen ist. Da die zulässige Geschwindigkeit von 50 Km/h während dieser Fahrt überschritten wurde, sollte der Messwert dennoch verworfen werden. Alternativ dazu könnte im Datenmodell die zulässige Geschwindigkeit als aktuelle Geschwindigkeit hinterlegt werden.

Zusammenfassende Betrachtung der Testfahrten

Durch die drei Testfahrten am 14. Januar 2005 konnten insgesamt 57 Einzelbetrachtungen von Streckenabschnitten (Links) durchgeführt werden. Dabei wurde das zentralenseitige FTD-Verfahren auf seine Funktionsfähigkeit überprüft. Die Ergebnisse der Überprüfungen werden in den nachfolgenden Tabellen zusammenfassend dargestellt. Eine vollständige Abbildung aller betrachteten Detektorganglinien und Geschwindigkeitsganglinien würde den Umfang der Arbeit überschreiten. Daher wurde auf die Abbildung an dieser Stelle verzichtet.

Die Ergebnisse der Analysen werden für jede durchgeführte Fahrt einzeln dargestellt und kommentiert.

1. Fahrt, 14.01.2005; 11.00 – 11.15 Uhr; normale Befahrung mit 4 Endgeräten

LSA	Link-ID	1. Fahrt, 14.01; 11:00-11:15 Uhr (4 Endgeräte)					Interpretation			
		Uhrzeit	Anzahl Endgeräte	Geschwindigkeit	Stabw.	FTD-B.-Kennwert	V-FTD innerhalb Toleranz	Fusion erforderlich?	V-FTD plausibel?	Resultat korrekt?
[-]	[-]	[HH:MM:SS]	[-]	[km/h]	[km/h]	[-]				
	52591377	11:06:14	4	41,5	1,9	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52392191	11:06:15	4	45,0	15,6	1	Ja	Nein	Ja	Ja
vor A22	52390982	11:06:33	4	18,4	3,7	1	Ja	Nein	Ja	Ja
vor A45	52390981	11:06:56	4	30,2	12,6	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52433008	11:07:04	4	47,3	0,0	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52390980	11:07:09	4	62,4	9,8	1	Nein	Nein	Ja	Ja
	567287928	11:07:18	4	45,4	3,1	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	567287927	11:07:20	4	18,0	0,0	1	Ja	Nein	Ja	Ja
vor A13	52390979	11:07:24	4	34,4	4,3	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52390977	11:07:36	4	43,2	5,6	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52434145	11:07:47	4	40,9	3,2	1	Ja	Nein	Ja	Ja
vor A21	52390970	11:07:58	4	48,8	0,0	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52390788	11:08:08	4	54,0	0,0	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52390968	11:08:16	4	46,4	0,0	1	Ja	Nein	Ja	Ja
vor A14	52390983	11:08:30	4	33,7	3,0	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52390966	11:08:41	4	42,3	4,1	1	Ja	Nein	Ja	Ja
vor A151	52390961	11:08:52	4	46,3	2,3	1	Ja	Nein	Ja	Ja
	52390956	11:09:01	4	51,8	2,8	1	Ja	Nein	Ja	Ja
vor A15	52390604	11:09:28	4	12,0	4,8	1	Ja	Nein	Ja	Ja

Tabelle 9-6: Zusammenfassende Darstellung der FTD-Verfahrensbewertung; Testfahrt 14.01.2005; 11.00 – 11.15 Uhr; normale Befahrung mit 4 Endgeräten

Durch die gleichzeitige Verwendung von vier Endgeräten wird dem zentralenseitigen FTD-Verfahren der Eindruck vermittelt, dass mehrere Fahrzeuge einen Streckenabschnitt befahren. Der FTD-Bewertungskennwert liegt überall bei „1“ (plausible Werte). Eine Sensorfusion ist daher nicht durchzuführen. Die errechneten Geschwindigkeitsmesswerte sind somit alle korrekt, was sich auch mit den eigenen Beobachtungen während der Testfahrt deckt.

2. Fahrt, 14.01.2005; 11.45 – 12.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät

2. Fahrt, 14.01 - 11:45-12:00 Uhr (1 Endgerät)							Interpretation				
LSA	Link-ID	Uhrzeit	Anzahl Endgeräte	Geschwindigkeit	Stabw.	FTD-B.-Kennwert	V-FTD innerhalb Toleranz?	Fusion erforderlich?	Zahlwerte Detektoren innerhalb Toleranz?	V-FTD plausibel?	Resultat korrekt?
[-]	[-]	[HH:MM:SS]	[-]	[km/h]	[km/h]	[-]					
	52591377	11:48:33	1	5,2	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52392191	11:48:35	1	27,0	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
vor A22	52390982	11:48:48	1	31,3	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
vor A45	52390981	11:49:06	1	24,4	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
	52433008	11:49:17	1	34,4	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
	52390980	11:49:23	1	46,2	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
	567287928	11:51:47	1	2,7	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	567287927	11:51:49	1	18,0	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
vor A13	52390979	11:52:48	1	2,5	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52390977	11:52:58	1	47,2	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
	52434145	11:53:07	1	53,2	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
vor A21	52390970	11:53:17	1	53,7	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
	52390788	11:53:28	1	49,1	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
	52390968	11:53:36	1	46,4	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
vor A14	52390983	11:56:04	1	2,9	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52390966	11:56:18	1	36,0	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
vor A151	52390961	11:56:31	1	38,2	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
	52390956	11:58:58	1	3,4	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
vor A15	52390604	11:59:14	1	29,5	0,0	3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja

Tabelle 9-7: Zusammenfassende Darstellung der FTD-Verfahrensbewertung; Testfahrt 14.01.2005; 11.45 – 12.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät

Da nur ein Geschwindigkeits-Messwert pro Streckenabschnitt vorliegt, ist das Ergebnis einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen. Der FTD-Bewertungskennwert nimmt überall einen Wert von „3“ an (auf Plausibilität zu überprüfende Messwerte). In fünf der 19 Streckenabschnitte ist die ermittelte Geschwindigkeit außerhalb des Vertrauensbereichs der Geschwindigkeitsreferenz. Für diese Streckenabschnitte ist zur weiteren Plausibilitätsprüfung eine Fusion mit den Detektordaten im zugehörigen Streckenabschnitt durchzuführen. Die Detektorwerte in den fünf gesondert betrachteten Streckenabschnitten sind alle innerhalb des Vertrauensbereichs der Detektorreferenz. Dies lässt darauf schließen, dass keine Störungen in dem Streckenabschnitt zu erkennen sind. Die ermittelten Geschwindigkeitsmesswerte sind daher nicht plausibel und müssen alle verworfen werden.

Das FTD-Verfahren liefert für alle Streckenabschnitte korrekte Ergebnisse.

3. Fahrt, 14.01.2005; 12.45 – 13.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät

LSA	Link-ID	3. Fahrt, 14.01 - 12:45-13:00 (1 Endgerät)					Interpretation				
		Uhrzeit	Anzahl Endgeräte	Geschwindigkeit	Stabw.	FTD-B.-Kennwert	V-FTD innerhalb Toleranz?	Fusion erforderlich?	Zahlwerte Detektoren innerhalb Toleranz?	V-FTD plausibel?	Resultat korrekt?
[-]	[-]	[HH:MM:SS]	[-]	[km/h]	[km/h]	[-]					
	52591377	12:51:22	1	34,1	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52392191	12:51:24	1	27,0	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A22	52390982	12:51:38	1	29,1	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A45	52390981	12:54:15	1	2,8	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52433008	12:54:24	1	42,0	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52390980	12:54:31	1	39,6	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	567287928	12:54:41	1	39,3	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	567287927	12:54:42	1	36,0	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
vor A13	52390979	12:54:45	1	49,2	0,0	3	Nein	Ja	Ja		Ja
	52390977	12:54:56	1	42,9	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52434145	12:55:07	1	43,5	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A21	52390970	12:56:02	1	9,8	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52390788	12:56:14	1	45,0	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
	52390968	12:56:23	1	41,2	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A14	52390983	12:59:04	1	2,7	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52390966	12:59:15	1	45,8	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
vor A151	52390961	12:59:46	1	16,0	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
	52390956	12:59:59	1	38,8	0,0	3	Ja	Nein		Ja	Ja
vor A15	52390604	13:00:49	1	9,4	0,0	3	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja

Tabelle 9-8: Zusammenfassende Darstellung der FTD-Verfahrensbewertung; Testfahrt 14.01.2005; 12.45 – 13.00 Uhr; Staufahrt mit 1 Endgerät

Wie auch bei der zweiten Testfahrt liegen für jeden Streckenabschnitt nur Geschwindigkeits-Messwert vor. Die Messwerte sind daher einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen. Der FTD-Bewertungskennwert nimmt überall einen Wert von „3“ an (auf Plausibilität zu überprüfende Messwerte). In 8 der 19 Streckenabschnitte ist die ermittelte Geschwindigkeit außerhalb des Vertrauensbereichs der Geschwindigkeitsreferenz. Für diese Streckenabschnitte ist zur weiteren Plausibilitätsprüfung eine Fusion mit den Detektordaten im zugehörigen Streckenabschnitt durchzuführen. Die Detektorwerte in den 8 gesondert betrachteten Streckenabschnitten sind alle innerhalb des Vertrauensbereichs der Detektorreferenz. Dies lässt darauf schließen, dass keine Störungen in dem Streckenabschnitt zu erkennen sind. Die ermittelten Geschwindigkeitsmesswerte sind daher nicht plausibel und müssen alle verworfen werden.

Das FTD-Verfahren liefert für alle Streckenabschnitte korrekte Ergebnisse.

9.8 Bewertung von Ortungssensoren für mobile Endgeräte

Neben der allgemeinen Untersuchung der Genauigkeit und Verfügbarkeit ist für die Bewertung auch die Analyse der jeweiligen Randbedingungen des Anwendungsfalls wichtig. Es werden daher drei für mobile Lotsendienste wesentlichen Umgebungsbedingungen (Outdoor, Indoor, InVehicle) unterschieden und die einzelnen Sensor-Technologien entsprechend bewertet, ob sie in diesen Situationen verfügbar und sinnvoll einsetzbar sind **[MULTIMEDIAINITIATIVE, 2002]**).

Darüber hinaus sind weitere Kriterien wie die Genauigkeit, der Zeithorizont einer Realisierung zu beachten und die Notwendigkeit, a priori Wissen in Form einer geografischen Datenbank vorzuhalten.

Neben den spezifischen Eigenschaften der benannten Navigationstechnologien ist auch die korrekte zeitliche Zuordnung der Messzeitpunkte der einzelnen Sensoren äußerst wichtig, damit diese adäquat synchronisiert und ihre Messwerte fusioniert werden können.

Tabelle 9-9: Situationsabhängige Positionsbestimmung für Fußgängernavigation

Situationen			Sinnvolle bzw. verfügbare Ortungssensoren / -techniken								
			GPS, DGSP, Galileo	GSM / UMTS			Lokale Infrastruktur		Koppel- navigtion	Map Matching	LORAN-C
				Cell-ID	Feld- stärken, TA	E-OTD (TDOA)	WLAN	Baken & Bluetooth			
Outdoor	Freie Sicht zum Himmel		++	++	++	++	0 ¹	0 ¹	++	0	+
	Eingeschränkte Sicht zum Himmel		+ ²	++	0	++	+ ¹	+ ¹	++	0	0
Indoor	Hochbau		- ²	++	+	+	+	+	++	+	0
	Tiefbau		- ²	+	0	0	0	+	++	+	-
Im Fahr- zeug	mit Schnitt- stelle	Liniengebundener Verkehr (ÖV)	++ ²	++	+	+	+	++ ³	++ ³	+	-
		Freier Verkehr	++ ³	++	+	+	0	0	++ ³	+	-
	ohne Schnitt- stelle	Liniengebundener Verkehr (ÖV)	-	++	+	+	0	-	-	0	-
		Freier Verkehr	-	++	+	+	0	-	-	0	-
	Fahrrad, Motorrad		+ ²	++	+	++	0	0	++	+	0

Situationen			Sinnvolle bzw. verfügbare Ortungssensoren / -techniken								
			GPS/ DGPS Galileo	GSM / UMTS			Lokale Infrastruktur		Koppel- navigation	Map Matching	LORAN-C
				Cell-ID	Feld- stärken, TA	E-OTD (TDOA)	WLAN	Baken & Bluetooth			
Rand- bedin- gungen	Genauigkeit (CEP95)		Ca. 3 - 30m	Ca. 200m – 35km	(Cell-ID)++	ca. 300m	ca. 10- 100m	ca. 1- 100m	Weg- abhängig	-	Ca. 50m – 5km
	Zeitbedarf für Positionslösung (Time to Fix)	Kaltstart	Ca. 40s – 300s	Ca. 10s ?	Ca. 10s ?	?	Ca. 10s ?	Ca. 10s ?	0s	-	Ca. > 5 min
		Im Betrieb	1s	< 1s ?	< 1s ?	?	< 1s ?	?	< 1s	< 1s	Ca.10 s
	Realisierungsaufwand / Zeithorizont		++	+	+	-	o	o	+	o	-
	Benötigt Datenbank		nein	ja	ja	ja	(ja)	(ja)	nein	ja	(ja)

¹ Es ist davon auszugehen, dass in ländlich geprägten Regionen weniger lokale Infrastruktur aufgebaut wird als in innerstädtischen Gebieten.

² Ggf. lassen sich mit Pseudolites (Indoor-GPS) deutliche Verbesserungen erzielen. Diese Technologie steht jedoch voraussichtlich nicht in absehbarer Zeit zur Verfügung

³ Es wird davon ausgegangen, dass über die Fahrzeugschnittstelle die entsprechenden Sensoren des Kfz-Navigationssystems /bzw. des RBLs abgegriffen werden können.

Zur Bewertung sind die vorgestellten Sensoren nochmals in **Tabelle 9-10**, **Tabelle 9-11**, **Tabelle 9-12** als gut, bedingt und nicht geeignete Technologien für die Fußgängernavigation zusammengefasst.

Sensor	positiv	negativ
GPS	Preiswert, gute Outdoor-Positionierung, einfache Handhabung, weltweite Abdeckung	Keine Indoor-Positionierung, Störungen durch Mehrwegeausbreitung und Abschattung
Mobilfunk-Ortung	Technologie in jedem Endgerät integriert, relativ gute Abdeckung	Benötigt Datenbank, nur grobe Positionierung möglich
Baken & Bluetooth	Technologie in fast allen Endgeräte integriert	Geringe Reichweite, Installationsaufwand von Infrastruktur
Koppelnavigation	Überall verfügbar, keine Infrastruktur, keine Datenbank	Positionsfehler wächst mit dem zurückgelegten Weg

Tabelle 9-10: Gut geeignete Technologien zur Fußgängernavigation

Sensor	positiv	Negativ
DGPS	Höhere Genauigkeit	Verbessert nicht die Verfügbarkeit, hohe Betriebskosten, bzw. Kaufpreis
WLAN	Gute Indoor-Positionierung, ständig wachsende Verbreitung	hoher Stromverbrauch, braucht Infrastruktur

Tabelle 9-11: Bedingt geeignete Technologien zur Fußgängernavigation

Sensor	Ablehnungsgrund
Loran-C	Baugröße, Genauigkeit, Preis
Gallileo	Noch nicht am Markt (Zukunftstechnologie)
UMTS	Noch nicht am Markt (Zukunftstechnologie)

Tabelle 9-12: Ungeeignete Technologien zur Fußgängernavigation

9.9 Projektbeschreibung

COX - Communication and Orientation eXpert

Die Globalisierung und Liberalisierung der Wirtschaftsmärkte fordert von einer modernen Gesellschaft sowohl im Berufsleben als auch in der Ausbildung in wachsendem Maße uneingeschränkte und spontane Mobilität. Seit mehreren Jahren wird deshalb der Ansatz der Intermodalität propagiert. Es sind daher immer stärkere Verflechtungen zwischen den Verkehrssystemen erforderlich. Vor allem Öffentliche Verkehrssysteme sehen darin eine Chance, ihre Wettbewerbsfähigkeit sowohl gegenüber Mitkonkurrenten als auch gegenüber dem Motorisierten Individualverkehr (MIV) aufrecht zu erhalten.

Meist wird dabei aber vergessen, dass sich mit wachsender Intermodalität einer Start-/Zielverbindung auch die vorhandenen Zugangshemmnisse zu den Verkehrssystemen (z. B. Orientierung in Halte- und Verknüpfungspunkten, Informationen über den Betriebszustand der Verkehrssysteme und seiner Alternativen) addieren und somit verstärken. Der qualitative und quantitative Informationsbedarf der Kunden steigt somit mit dem Intermodalitätsgrad einer Start-/Zielverbindung, vor allem, wenn individuelle Präferenzen wie z. B. billigste, zuverlässigste oder ökologischste Routen Berücksichtigung finden sollen. Doch auch bei Aufgaben- und Verkehrsträgern wird der steigende Intermodalitätsgrad in den Verkehrsnetzen höhere Anforderungen an die Erhebung und Bereitstellung aktueller Verkehrsdaten und Informationen für die Steuerung und das Management von Betriebs- und Infrastrukturressourcen mit sich bringen. Somit ist es oberstes Ziel eines intermodalen Mobilitätsgedankens, die einfache Nutzung von Informationen zu den Verkehrsangeboten sowie zur aktuellen Verkehrslage für die Kunden zu jeder Zeit und an jedem beliebigen Ort bereitzustellen. Die Dringlichkeit dieser Forderung und ihr Zusammenhang mit vielen anderen Handlungsfeldern im Verkehr wird aber erst seit wenigen Jahren bewusst wahrgenommen.

Die bislang entwickelten Mobilitätsdienste vereinen bislang nicht die erfolgsspezifischen Merkmale (z.B. individuelle situations- und positionsabhängige Ad-Hoc-Informationen, zu jeder Zeit und an jedem Ort), um den Nutzern den alltäglichen Prozess der Ortsveränderung auf Dauer zu vereinfachen. Hierin liegt aber der Schlüssel zu einer breiten Akzeptanz und Nutzung eines positions- und situationsbezogenen Lotsendienstes durch die Bevölkerung und damit seines wirtschaftlichen Erfolgs.

Im Rahmen der multimedia-initiative des Landes Hessen, getragen durch das Land Hessen und die Deutsche Telekom AG, wurde ein neuartiger Lotsendienst COX (Communication & Orientation eXpert) konzipiert und umgesetzt. Dieser soll die Lücke der verkehrsmittelübergreifenden und individuellen Reiseinformationen schließen und Schlüsseltechnologien bereitstellen. Eine wichtige Grundlage für den Betrieb des geplanten Dienstes ist die Bereitstellung und die Aufbereitung aktueller Daten im Straßenverkehr und im öffentlichen Verkehr.

Mit dem Projekt COX (Communication and Orientation eXpert) wird eine neue Informationstechnologie entwickelt. Das von den meisten Reisenden ohnehin mitgeführte Mobiltelefon dient dabei sowohl als Informationsquelle für situations- und positionsbezogene Lotsendienste als auch als mobiles Verkehrsdatenerfassungsgerät für FTD („Floating

Traveller Data“), das einen Beitrag zur Verbesserung des intermodalen Verkehrsmanagements liefert. Innerhalb des Lotsendienstes COX sollen Verkehrsinformationen im

- Straßenverkehr,
- öffentlichen Verkehr,
- für Fußgänger und
- Radfahrer

auf mobilen Endgeräten angeboten werden. Die Akzeptanz des Lotsendienstes hängt sehr stark von der Aktualität, der Plausibilität und der Verfügbarkeit der bereitgestellten Informationen ab. Der Lösungsansatz konzentriert sich auf die Entwicklung eines intermodal ausgelegten, Ad Hoc Informationsdienstes im Verkehr für eine neue Generation mobiler Endgeräte (z.B. Smartphone, Pocket PC mit Ortungskomponente).

Hauptmerkmal wird dabei die verkehrsmittelübergreifende Lotsenfunktion sein. Dabei wird zwischen drei Servicezuständen unterschieden:

PLAN Der Kunde kann sich vor Reiseantritt über Ziele (LBS) und Verkehrsangebote informieren. Die geplante Route wird gespeichert und kann jederzeit abgerufen werden.

PILOT Hat der Kunde seine Reise konkretisiert und gespeichert (PLAN), wird er von Reisebeginn an vom Lotsendienst begleitet. Eventuelle Störungen auf der aktuellen Route werden dem Kunden rechtzeitig angezeigt. Reisealternativen werden automatisch angezeigt.

HELP Bei plötzlichen Störungen im Reiseablauf kann der Kunde sich an den intermodalen

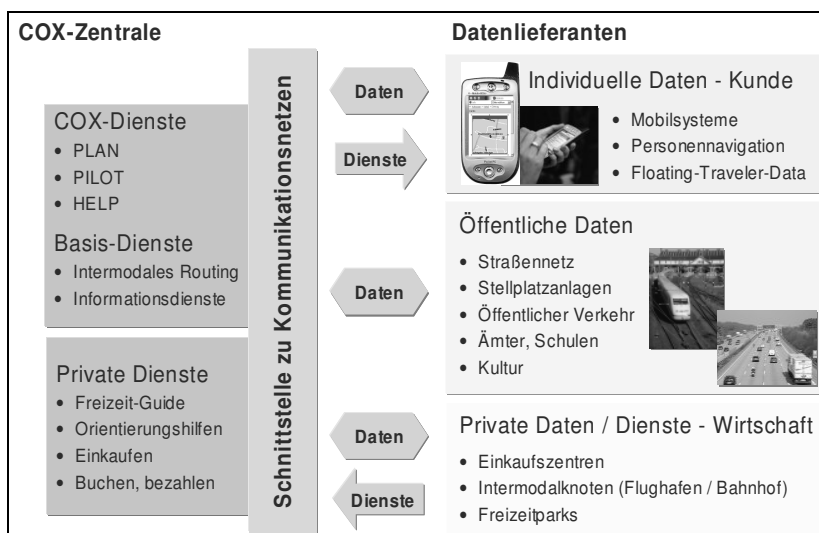


Bild 9-14: Systemarchitektur des positions- und situationsabhängigen Lotsendienstes COX

Verkehrsdienst wenden und um Hilfe bei der Fortführung der Reise anfragen. Daneben kann kurzfristige Hilfe in Notfällen (z.B. Unfall etc.) angefordert werden. Der Standort wird automatisch an eine Zentrale übermittelt.

Die Qualität des intermodalen Verkehrsdienstes wird durch die Art und Weise der Erhebung, Aufbereitung und Bereit-

stellung relevanter Verkehrsdaten sowie die Genauigkeit und Verfügbarkeit von Positions- und Richtungsdaten am mobilen Endgerät bestimmt. **Bild 9-14** zeigt die Systemarchitektur des Lotsendienstes. Darin wird zwischen Datenlieferanten auf der einen Seite und der COX-Zentrale auf der anderen Seite unterschieden. Die Daten des Straßenverkehrs, des öffentlichen Verkehrs (rechnergestütztes Betriebsleitsystem), private Daten (z.B. aus Einkaufszen-

tren) und individuelle Daten des COX-Nutzers (z.B. Positionsdaten, Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit) werden an die COX-Zentrale weitergeleitet. In der Zentrale werden die Informationen aufbereitet und für die COX-Dienste bereitgestellt.

Die Umsetzung der „Vision“ COX wurde in 3 Phasen unterteilt. In einer ersten Phase, die von Januar bis November 2003 verlief, wurde ein technisches Lösungskonzept durch die T-Systems GEI in Ulm, die t-info in München und das ZIV-Zentrum für integrierte Verkehrs-

Phase 1: Konzeption des Lotsendienstes COX			2003
Phase 2: Entwicklung der Schlüsseltechnologien			2004
Ortung Mobiltelefone Verbesserung der Ortung mobiler Endgeräte mit handytypischen Sensoren (GPRS, UMTS, WLAN, Bluetooth) u. GPS	Durchgängige Kommunikation zur Dienstbereitstellung in unterschiedlichen Netzen (GPRS, UMTS, WLAN, Bluetooth)	Floating Traveller Data (FTD) Methodenentwicklung und Umsetzung der Verfahren zur Ermittlung der Verkehrslage (ÖV, MIV, NMV)	
Phase 3: Umsetzung der Dienste			?

systeme an der Technischen Universität Darmstadt entwickelt. In Phase 2 wurden die technischen Komponenten der Handyortung, der durchgängigen Kommunikation und der Verkehrslageermittlung durch „Floating Traveller Data (FTD)“ entwickelt (2004) und umgesetzt. Aufbauend darauf soll in einer dritten Phase der Lotsendienst COX umgesetzt werden.

Bild 9-15: Einordnung des Themas FTD in das Konzept COX

Bild 9-15 fasst die Entwicklungsphasen des Lotsendienstes zusammen. Daneben ist die Einordnung des in dieser Arbeit behandelten Themas „Floating Traveller Data (FTD)“ hervorgehoben.

Mittlerweile lassen sich bereits erste Projekt-Erfolge vorweisen: So konnte COX am 26.07.2005 in Darmstadt der Öffentlichkeit präsentiert werden. Bei einer weiteren Präsentation während des Mobilitätskongresses am 16.09. im Rahmen der IAA in Frankfurt am Main wird erstmals das "Testbett" Darmstadt verlassen und die Übertragung auf eine Großstadt simuliert werden. Darüber hinaus wurde der Ansatz auf der Computermesse CeBIT 2006 in Hannover von der T-Systems und T-Traffic vorgestellt.

Weitere Informationen unter:

<http://www.hessen-media.de/mm/PECOX.pdf>

<http://www.mmi-hessen.de/dynasite.cfm?dssid=104&dsmid=3506s>

Lebenslauf

Name	Stefan Krampe
Geburtsdatum	27. Februar 1969 in Bochum
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch
Anschrift	Röhrenbach-Ring 17 85617 Aßling

Ausbildung

6/1988	Abitur amFreiherr-vom-Stein Gymnasium in Bochum
10/1988 - 3/1996	Studium an der Ruhr-Universität Bochum Fachrichtung: Bauingenieurwesen mit den Vertiefungsfächern Verkehrstechnik, Verkehrsplanung und Verkehrswegebau
12/1995 - 2/1996	Diplomarbeit zum Thema: „Auswirkungen einer neuen Halte- stellenform für Busse“, Die Arbeit wurde mit dem <i>Wolfgang- Teichgräber-Preis 1997</i> ausgezeichnet.
3/1996	Abschluß: Diplom

Berufstätigkeit

7/1991 - 6/1995	Studentischer Mitarbeiter im Rechenzentrums der Ruhr- Universität Bochum.
4/1996 - 6/1997	Ersatzdienst im Bereich der individuellen Schwerstbehinderten- betreuung.
8/1997 - 6/1998	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verkehrswesen von Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Brilon an der Ruhr-Universität Bo- chum.
10/1998 - 12/2004	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme an der TU Darmstadt unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Boltze.
Seit 01/2005	Selbständig beratender Ingenieur

Veröffentlichungen

- „Nutzung von Floating-Traveller-Data (FTD) für mobile Lotsendienste im Verkehr“;
Tagungsband HEUREKA, Karlsruhe 2005.
- „Optimierung der Tourenplanung für mobilitätseingeschränkte Personen“;
Tagungsband HEUREKA, Karlsruhe 2005.
- „Optimierung der Einzelbeförderung für Schulen und soziale Einrichtungen“;
Tagungsband AGIT, Salzburg 2004.
- „ICE-Neubaustrecke Rhein/Main - Rhein/Neckar, Anbindung Darmstadt. Beispiel für eine
integrierte Planung“; Tagungsband AMUS, Aachen 2004.
- „OptiTours - eine GIS-basierte Lösung zur Optimierung der Einzelbeförderung für Schulen
und soziale Einrichtungen“ in MapVision 12/2003 (Kundenmagazin MapInfo) und Telatlas
Kundenmagazin.
- „Auswirkungen einer neuen Haltestellenform für Busse“; DER NAHVERKEHR;
Ausgabe 1,2 / 97.

In der Schriftenreihe des Instituts für Verkehr an der Technischen Universität Darmstadt sind bisher folgende Hefte erschienen:

Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (ISSN 1613-8317):

- V1 G. Faust
Entwurf und Bau von stark überhöhten Fahrbahnen
1999
- V2 C. Korda
Quantifizierung von Kriterien für die Bewertung der Verkehrssicherheit mit Hilfe digitalisierter Videobeobachtungen
1999
- V3 State of the Art of Research, Development and Application of Intelligent Transport Systems (ITS) in Urban Areas
Proceedings of the Japanese-German Symposium, April 27, 2001
- V4 Verkehrssystem auf dem Weg zur freien Marktwirtschaft
Vorträge im Rahmen des Kolloquiums im Verkehrswesen am 11.06.2001
- V5 V. Blees, M. Boltze, G. Specht
Chancen und Probleme der Anwendung von Qualitätsmanagement in Verkehrsplanungsprozessen
2002
- V6 C. Lotz
Ermittlung von Detektorenstandorten für den Straßenverkehr innerorts
2002
- V7 N. Desiderio
Requirements of Users and Operators on the Design and Operation of Intermodal Interchanges
2002
- V8 S. Hollborn
Intelligent Transport Systems (ITS) in Japan
2002
- V9 M. Boltze, G. Specht, D. Friedrich, A. Figur
Grundlagen für die Beeinflussung des individuellen Verkehrsmittelwahlverhaltens durch Direktmarketing
2002
- V10 M. Boltze, A. Reußwig
First Review of Available Data: Modal Split in Different Countries
2000
- V11 P. Schäfer
Bürgerinformation, ein wichtiges Element der Bürgerbeteiligung
2003
- V12 M. Boltze
Fachgebietsbericht - September 1997 bis Dezember 2002
2003
- V13 R. Stephan
Einsatzbereiche von Knotenpunkten mit der Regelungsart "rechts vor links"
2003

- V14 V. Blees
Qualitätsmanagement in Verkehrsplanungsprozessen
2004
- V15 P. Schäfer
Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren
2004
- V16 A. Reusswig
Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen
2005
- V17 P. Pujinda
Planning of land-use developments and transport systems in airport regions
2006
- V18 M. Bohlinger
Grundlagen, Methodik und Verfahren der Verkehrsmanagementplanung
2006
- V19 V. H. Khuat
Traffic Management in Motorcycle Dependent Cities
2006
- V20 S. Krampe
Nutzung von „Floating Traveller Data (FTD)“ für mobile Lotsendienste im Verkehr
2006

Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik (ISSN 1614-9300):

- B1 F. Lademann
Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken
2001
- B2 J. Becker, E. Schramm
Barrierefreier Schienenpersonennahverkehr
Beschreibung und Bewertung der Anforderungen mobilitätseingeschränkter Menschen
2003
- B3 C. Axthelm
Umweltbahnhof Rheinland-Pfalz
2004
- B4 T. Muthmann
Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung
2004
- B5 J. Becker
Qualitätsbewertung und Gestaltung von Stationen des regionalen Bahnverkehrs
2005
- B6 C. Axthelm
Kriminalität im Schienenverkehr in Ballungsräumen

- B7 M. Frensch
Ermittlung von wirtschaftlich und betrieblich optimalen Fahrzeugkonzepten für den Einsatz im Regionalverkehr

Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt (ISSN 1614-9319):

- S1 J. S. Bald
Risikoanalysen im Straßenwesen
2001
- S2 U. Stöckert
Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau
2002
- S3 M. Socina
Griffigkeit
2002
- S4 V. Root
Prüfung der Eignung von ausgewählten Asphaltmischungen auf Griffigkeit
2002
- S5 H.-F. Ruwenstroth
Auswirkungen von wiederverwendeten Fräsasphalten mit polymermodifiziertem Bitumen und stabilisierenden Zusätzen auf Asphalteigenschaften
2003
- S6 K. Fritscher
Aufnahme von Wegweisungsinformationen
2004
- S7 B. Bach
Untersuchungen der Auffälligkeit von Verkehrszeichen und Werbung im Straßen auf der Grundlage inhaltlicher Eigenschaften und ihrer psychologischen Wirkung
2005
- S8 S. Riedl
Rückrechnung dynamischer Tragfähigkeitswerte aus den Messdaten des Falling Weight Deflectometer (FWD)
2006